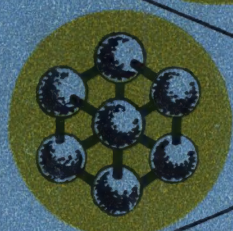
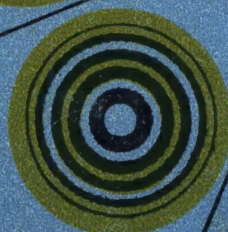
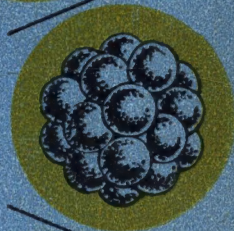


Г. Липсон

ВЕЛИКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ФИЗИКЕ



Движение
Атмосфера · Теплота
Газы · Звук · Свет
Оптические инструменты
Магнетизм и электричество
Излучение
Строение вещества
Строение атомов

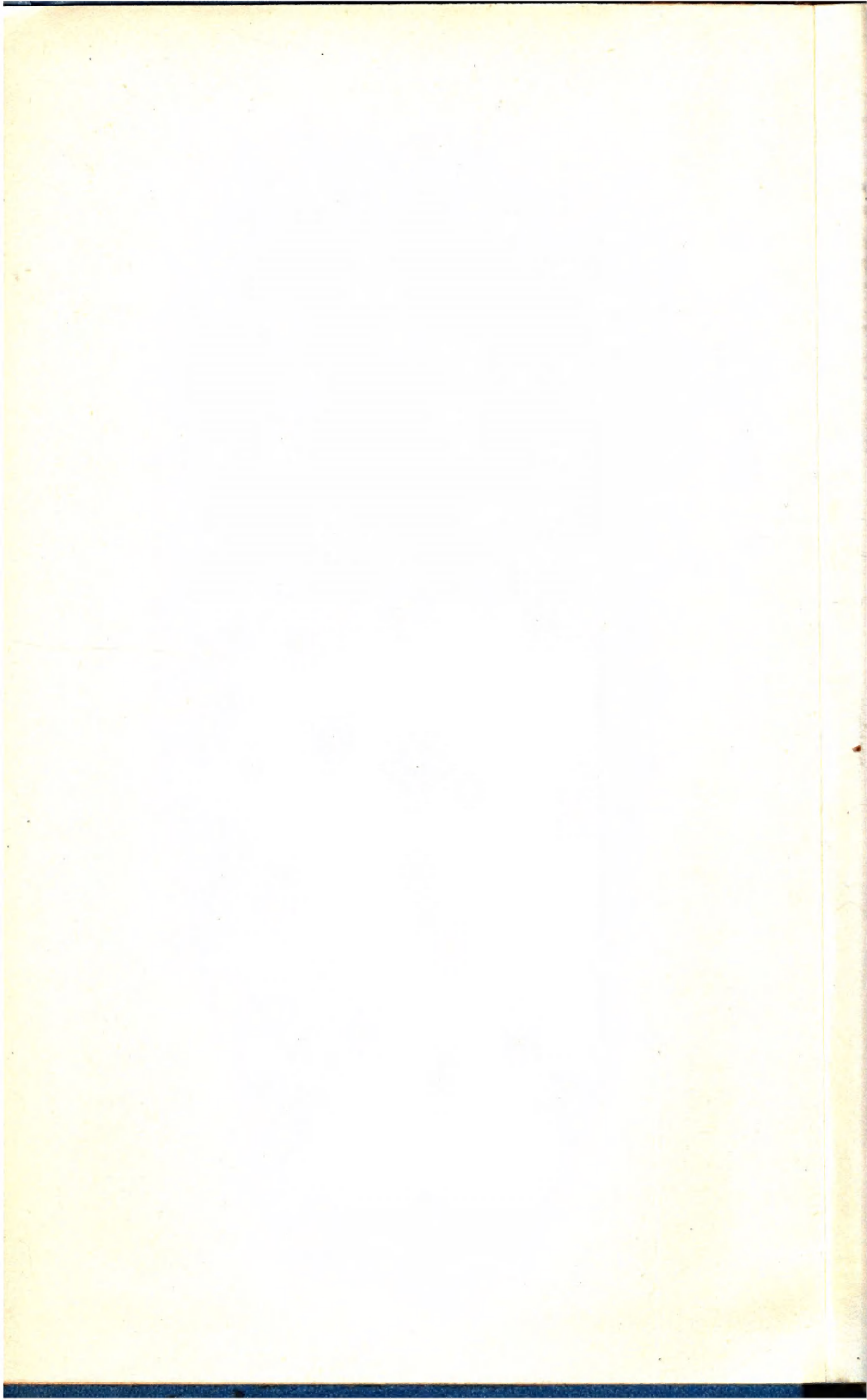
Издательство «Мир» · Москва

James

Модель ошита.

Томма и Ситвагта

Фш. № 6 1974.2





H. Lipson

*F. R. S. Professor of Physics
University of Manchester
Institute of Science and Technology*

**THE GREAT
EXPERIMENTS
IN PHYSICS**

Oliver & Boyd Edinburgh 1968

Г. Липсон

**ВЕЛИКИЕ
ЭКСПЕРИМЕНТЫ
В ФИЗИКЕ**

*Перевод с английского
И. Б. Виханского и В. А. Кузьмина*

*Под редакцией
кандидата физ.-мат. наук
В. И. Рыдника*

Издательство «Мир» Москва 1972

В книге известного английского физика Г. Липсона рассказывается о тех экспериментах, которые сыграли выдающуюся роль в становлении физики как науки. Начав с описания первых опытов Галилея и Ньютона, автор завершает изложение опытами Резерфорда, Милликена, Майкельсона — Морли, на которых базируются современная ядерная физика и теория относительности. Книга написана живо, эмоционально, занимательно, насыщена фактами и снабжена многочисленными иллюстрациями, в том числе заимствованными из оригинальных работ Ньютона, Гука, Фарадея и других исследователей.

Книга представляет интерес для студентов и школьников, желающих расширить свой кругозор в области физики. Она полезна также преподавателям, которые найдут здесь обширный материал для обогащения лекций фактическими сведениями.

Редакция литературы по физике

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Предлагаемая вниманию читателя книга Г. Липсона — по существу маленькая история физики, рассказанная с позиций физического эксперимента. Такой метод изложения неизбежно делает содержание книги фрагментарным, и она становится «сборником рассказов» о крупнейших опытах в физике за последние четыре века ее существования. Рассказов, не одинаковых по своей теме и подробностям: в одном случае акцент ставится на методике опыта, в другом — на экспериментальной установке, в третьем — на получаемых результатах и оценке ошибок опыта. Такое «сюжетное разнообразие» само по себе делает книгу Липсона занимательной. В большой степени этому способствует и язык книги — живой, эмоциональный, порой совсем разговорный и по этой причине кое-где даже трудный для перевода.

Сказанным не ограничиваются достоинства книги Липсона. Очень важны не подчеркиваемые им прямо, но ощущаемые почти на каждой странице связь, взаимообусловленность физических открытий, коллективный дух в физике. Этот дух чувствуется буквально с первых шагов «большой» физики, с XVII века, и позволяет говорить о том, что «незримые колледжи» как форма содружества ученых вовсе не являются особенностью сегодняшнего дня. Липсон неоднократно обращается к вопросу приоритета в том или ином открытии, но везде обсуждает этот вопрос с позиций правильной оценки взаимоотношений коллективного и индивидуального в науке. Следует только с сожалением отметить, что многие замечательные эксперименты русских и советских ученых не нашли никакого отражения в этой книге.

Наряду с общеизвестными сведениями читатель сможет почерпнуть из книги немало сведений, не слишком известных. Познавательная ценность книги увеличивается благодаря воспроизведению в ней оригинальных рисунков Ньютона, Фарадея, Кавендиша и других экспериментаторов, а также их опытных данных в «первозданном» виде. Очень хорошо, что Липсон везде, где только можно, говорит о мнимой легкости «веревочно-сургучных» экспериментов, показывая действительные их трудности; в этом отношении особенно интересно изложение экспериментов Ома.

Автор все время видит перед собой читателя книги и ведет изложение, почти нигде не вульгаризируя его. Только в редких случаях такт популяризатора изменяет ему, и тогда появляются «неаккуратные» высказывания, потребовавшие комментариев редактора книги.

Следует сказать несколько слов о заключительной главе «Будущее физики». В самом ее начале Липсон пессимистически заявляет, что будущее физики сомнительно. Никакой развернутой аргументации своему тезису он, однако, не дает, а вкратце ее можно сформулировать так: «стоящие перед физикой задачи слишком сложны, а решение их слишком дорого». Впрочем, он все же оставляет физике более «доступное», но потому и второстепенное поле деятельности. Эта глава вообще не очень удачна. Она не содержит описания каких-либо, даже мыслимых, экспериментов и в этом отношении чужда книге. Тем не менее мы решили сохранить ее в русском переводе, полагая, что для читателя, безусловно, интересно узнать, как представляет себе будущее физики видный ученый современности.

Главы 6 и 7 переведены В. А. Кузьминым, остальное — И. Б. Виханским.

В. И. Рыдник

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Я надеюсь, что читатель правильно поймет цель этой книги. Она состоит в пропаганде экспериментальной физики. Теория играла и продолжает играть важную роль в физике, но она всегда опирается на эксперимент: теория получает признание лишь в том случае, если она приводит к результатам, которые могут быть проверены экспериментально. В сознание многих физиков каким-то образом проникло убеждение, что теория выше практики и что выдвинуть новую теорию важнее, чем провести решающий эксперимент. Эта точка зрения лишена всяких оснований. Часто такие эксперименты в основе своей просты, и более поздние исследователи упускают из виду, сколько изобретательности потребовалось, чтобы их придумать. При написании этой книги я стремился еще раз подчеркнуть важное значение подобных экспериментов и показать, как они повлияли на становление современной физики.

По существу эта книга представляет собой краткую историю физики с точки зрения экспериментатора. Не пытаясь давать детальные описания, я старался объяснить, почему — насколько я могу судить — были проведены те или иные эксперименты, какое влияние они оказали на другие разделы физики и как ученые, выполнившие их, реагировали на деятельность своих коллег. Надо всегда помнить, что великие физики были, кроме всего прочего, обыкновенными людьми с присущими им пристрастиями и предубеждениями, они могли быть непоследовательными, а подчас обладали скверным характером. Я не колеблясь рассказывал об этом в тех случаях, где, как мне казалось,

эти человеческие качества повлияли на ход развития физики.

Выбор экспериментов и способ их освещения в этой книге, очевидно, в значительной степени субъективны. Мне нет нужды в этом оправдываться: если бы я подходил к изложению не с позиций физика, а с позиций стороннего наблюдателя, то это повредило бы цели книги. Но я пытался дать понять читателю, в каких местах давал волю своим эмоциям, и говорил в этих случаях от первого лица. Будучи физиком, а не историком науки, я не имел возможности приводить точные ссылки на источник для каждого описанного эпизода. В большинстве случаев я как можно ближе придерживался оригинала, в то же время некоторые моменты излагал по памяти, так как они почерпнуты из источников, которые я сейчас затрудняюсь указать.

По этой причине и по многим другим книгу не следует рассматривать как авторитетное справочное пособие, а отсутствие библиографии и примечаний должно окончательно рассеять у читателя впечатление, что она представляет собой «ученый» трактат. Недостающие сведения читатель сможет найти в других источниках.

Г. Липсон

1. Движение

Движение — одно из наиболее очевидных свойств материи. Человек с помощью мышц может двигать теми или иными частями своего тела и перемещаться с места на место; он может приводить в движение другие тела; он умеет использовать энергию, скрытую в природных топливах, чтобы заставить двигаться различные виды транспорта. Человек знает, что если прекращается усилие, то прекратится и движение. В таком случае, казалось бы, нет ничего естественнее предположить, что движение есть нечто такое, что требует усилия, и сохраняется, только пока прикладывается усилие. Такое представление было высказано Аристотелем (384—322 гг. до н. э.); будучи провозглашено столь великим авторитетом, оно принималось на веру учеными в течение многих столетий.

А ведь существовали явные доказательства неправильности этого представления. Траектория брошенного под углом к горизонту тела искривляется. Почему? Аристотелева логика утверждала, что для движения тела ему необходимо сообщить импульс; импульс должен сохраняться неизменным в течение некоторого времени, обуславливая движение тела под углом к горизонту вверх; затем импульс должен постепенно ослабевать, в результате чего появляется искривленная часть траектории, и наконец, он должен исчезнуть, после чего тело сможет свободно падать. Если бы эта картина была верна, то заключительная часть траектории такого тела была бы вертикальной. Другой пример: если было бы справедливым представление Аристотеля, то тело, брошенное в стену, не отскакивало бы от нее¹⁾. Но никто, видимо, так не размышлял, а если и

¹⁾ То есть не приобретало бы импульс обратного знака,—
Прим. ред.

размышлял, то о своих выводах благоразумно помалкивал.

Нужен был действительно великий ум, чтобы преодолеть этот барьер и взглянуть на проблему движения по-новому. Первый толчок в этом направлении дал Галилей (1564—1642). Это произошло в замечательном XVI веке, когда новые идеи появлялись и во многих других областях человеческой деятельности. Галилей вынашивал мысль о проверке логических заключений экспериментом. Какое наслаждение он должен был испытывать, когда его идеи подтверждались экспериментом, а экспериментальные результаты подсказывали новые идеи! И как он, наверное, был подавлен и расстроен, видя, что воздвигнутое им солидное здание из фактов и теории является объектом подозрительного отношения со стороны его коллег, как омрачало его жизнь их противодействие. Тем не менее до конца своей жизни Галилей не переставал провозглашать свои идеи и стремился увековечить их для потомков, понимая, насколько они важны. Как он был прав!

Первым достижением Галилея было выдвинутое им представление о том, что движение само по себе не важно. В самом деле, человек, находящийся в закрытой со всех сторон камере, не может вообще знать, движется он или нет, пока камера находится в состоянии равномерного движения; человек способен воспринимать только *изменения* в движении — ускорения. Галилей, по-видимому, нигде не зафиксировал это утверждение, считая его само собой разумеющимся. Галилей говорит, что тело, движущееся без трения по горизонтальной плоскости, будет продолжать двигаться с постоянной скоростью; он говорит это, словно высказывая самое обычное утверждение. В действительности же оно означало решительный отход от теории Аристотеля.

Гюйгенс (1629—1695) развил утверждение Галилея: он указал, что тело, движущееся без трения по горизонтальной плоскости, будет двигаться с постоянной скоростью, «пока оно не встретит какое-нибудь препятствие». Но утверждение, что тело движется с постоянной скоростью, пока на него не подействует внешняя сила, еще предстояло сформулировать Ньютону (1642—1727). (Большая заслуга Ньютона в том, что он формулировал физические

законы ясно и кратко, а ясность и краткость существенно помогают правильному мышлению.)

Таким образом, Галилей сделал первый крупный шаг в физике: он убедился в том, что важны изменения в движении, а не равномерное движение само по себе. Ускорения — вот что существенно. Придя к такому выводу, Галилей начал изучать ускорение свободно падающего тела.

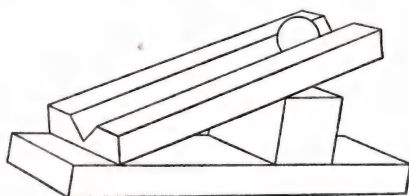
Прежде всего ему предстояло установить, что следует понимать под ускорением — изменение скорости со временем или с пройденным расстоянием. Сейчас нам довольно трудно оценить важность такой постановки задачи, ибо мы слишком привыкли к первому определению. Для Галилея же это было настоящей преградой, которую нужно было преодолеть, прежде чем он смог продвинуться вперед. Галилей считал, что тело при свободном падении движется с постоянным ускорением. Он стремился поэтому найти связь между проходимым при падении расстоянием и временем с точки зрения обоих определений ускорения, чтобы проверить свой вывод путем эксперимента.

Галилей смог отказаться от второго определения ускорения в результате чисто логических рассуждений. Он говорит, что если скорость тела пропорциональна пройденному им расстоянию, то его скорость в конце некоторого отрезка пути будет равна половине скорости в конце вдвое большего отрезка пути. Значит, тело пройдет удвоенный путь за то же самое время, что и данный отрезок пути, — явная нелепость! (Галилей смешивал понятия конечной и средней скорости.) Логические рассуждения привели Галилея к тому определению ускорения, которое принято нами теперь, и в своих «Диалогах» он отводит много места вопросу об ускорении.

При изучении свободного падения тел Галилей столкнулся с трудной задачей измерения времени. Галилей придумал способ замедлить процесс падения, заставив тело двигаться по наклонной плоскости с небольшим уклоном. Он знал теоретически, что при этом должен меняться лишь масштаб движения, и провел следующий эксперимент. Галилей прорезал в куске твердой древесины строго прямолинейный желоб с хорошо полированными стенками и, установив его под углом к горизонту (фиг. 1), скатывал вниз по желобу первоначально покоившийся бронзовый

шар. Он измерял время прохождения шаром отрезков пути различной длины. Поскольку точные часы в то время еще не были изобретены, Галилей взвешивал воду, вытекавшую из большого резервуара через тонкую трубку за время перемещения шара от одной точки желоба до другой. Он обнаружил, что это время было в точности пропорционально корню квадратному из пройденного расстояния в согласии с предположением о постоянном ускорении, т. е. подтвердил свое предсказание.

Изучая ускорение свободно падающего тела, Галилей прежде всего рассмотрел утверждение Аристотеля, соглас-



Ф и г. 1. Схема эксперимента Галилея для исследования движения с постоянным ускорением.

но которому скорость падающего тела пропорциональна его весу. Аристотель, вероятно, высказывал это утверждение, имея в виду, что легкое тело, скажем лист, слетающий с дерева, падает значительно медленнее, чем камень. Он, очевидно, не проводил никаких измерений, которые, несомненно, показали бы, что он неправ; это утверждение имело чисто качественный характер. Но когда великий человек делает какое-нибудь высказывание, пусть небрежное, люди меньшего масштаба склонны вкладывать в него больше, чем имел в виду автор. В данном случае это можно было истолковать как количественную связь между весом и скоростью падения тела.

Галилей пришел к выводу, что утверждение Аристотеля неверно, путем следующих рассуждений. Рассмотрим два тела разного веса и предположим, что более тяжелое падает быстрее, чем более легкое. Как будут себя вести оба тела, если их скрепить вместе? Более легкое тело должно замедлять движение более тяжелого. Но вместе они обра-

зуют более тяжелое тело и, таким образом, должны падать еще быстрее. Единственный выход из этого тупика — предположить, что оба тела должны падать с одинаковой скоростью.

Галилей проделал опыт. Он взял пушечное ядро массой 80 кг и мушкетную пулю массой около 200 г и сбросил их с высоты примерно 60 м. Оба тела достигли поверхности земли одновременно. Теория Аристотеля потерпела сокрушительное поражение. Согласно легенде считают, будто Галилей, который значительную часть своей жизни был профессором в Пизе, использовал для этого эксперимента пизанскую падающую башню. Башня эта, безусловно, как нельзя лучше подходит для упомянутой цели, хотя нигде не указано, что эксперимент проводился на ней. Галилей несколько раз ссылаясь на этот эксперимент в своих «Диалогах», но подробно его не описывает. Тем не менее это, возможно, был самый важный эксперимент в его жизни.

Последователем Галилея был Ньютон, родившийся в год смерти Галилея — в 1642 г. Ньютон придал ясность утверждению Галилея, облекши его в форму своего первого закона движения. Затем Ньютон дал ему количественную формулировку — огромный шаг вперед, — постулировав, что ускорение пропорционально вызывающей его силе, а коэффициент пропорциональности представляет собой массу тела.

Ведется много дискуссий о смысле этого закона. Ньютон определял массу как произведение плотности на объем, хотя плотность можно определить только через массу. Может быть, масса не поддается определению, как не поддаются определению понятия длины и времени? Мне кажется, что если мы приняли понятия длины и времени, то массу можно определить через них, даже если мы ничего не знаем о силе, кроме того, что постоянную силу можно по желанию воспроизвести, например подвесив гирию на веревке, перекинутой через блок и прикрепленной к легкой тележке.

Мы можем измерить развиваемое ускорение при заданной массе, которую несет тележка. Какое-нибудь другое тело обладает такой же массой, если та же сила вызывает такое же его ускорение. Таким путем можно набрать несколько тел с одинаковой массой. Соединяя воедино разное

число таких тел, можно убедиться в том, что постоянная сила вызывает ускорение, обратно пропорциональное массе. В таком случае можно найти неизвестную массу, если измерить ускорение, вызываемое действием этой силы.

Во всех этих опытах относительно силы не предполагалось ничего, кроме того, что она вызывает ускорение. Поскольку мы теперь знаем все, что нужно, о массе, мы можем увеличить приложенную силу, изменив число гирь, подвешенных на веревке, и сделав разумное предположение, что сила пропорциональна их массе. Мы можем убедиться в том, что ускорение тела данной массы пропорционально силе. Теперь мы можем найти неизвестную силу, измерив ускорение, которое оно сообщает известной массе. Эти опыты дают нам возможность проверить оба закона движения и совершенно объективно определить массу.

Усвоив как следует эти фундаментальные основы механики, мы можем теперь обратиться к одному из величайших экспериментов в физике, который, собственно, не был экспериментом, ибо не был запланирован, и экспериментатор принимал в нем участие лишь в качестве наблюдателя. Речь идет о яблоке, которое упало в саду возле дома Ньютона в 1666 г.

История эта вполне достоверна, но часто ее считают слишком малозначащей, чтобы в нее можно было поверить. Для тех, кто представляет себе ученых только лишь как угрюмых, серьезных людей, занимающихся одними важными вещами, эта история должна казаться почти анекдотом: чтобы величайший в мире ум заинтересовало падение яблока?! Для тех, кто имеет известное представление о том, как работает мысль ученого-физика, эта история, однако, вполне правдоподобна. Стоит ее рассказать еще раз в качестве примера того, как много можно заключить из явно незначительного факта.

Ньютон говорил, что, заметив, как упало яблоко, он задал себе вопрос: почему оно упало вниз, а не в сторону или даже вверх? Ньютон ответил, как ответил бы любой образованный человек того времени, что сила тяготения Земли заставила яблоко падать в направлении центра Земли. (Тот факт, что тела падают к центру Земли, рассматривался многими как доказательство того, что Земля — центр Вселенной!) Ньютон затем спросил себя: как далеко

простирается действие этой силы? На вершинах гор и холмов она явно действует. А сказывается ее действие дальше? *Может ли оно достигать Луны?* Другими словами, не подобна ли Луна гигантскому яблоку, которое все время притягивается к Земле с силой, как раз достаточной, чтобы помешать Луне улететь по касательной в космическое пространство?

Представление о том, что тяготение может действовать через пространство, явилось замечательным вкладом Ньютона в физику. Гипотезу эту можно было проверить, воспользовавшись известными данными — продолжительностью лунного месяца, расстоянием от Луны до Земли, радиусом Земли и значением ускорения свободного падения g . Все, что Ньютону нужно было сделать, — это установить, является ли сила, действующая на Луну, в точности такой, какая требуется, чтобы удерживать ее на круговой орбите. При меньшей силе Луна распрощалась бы с Землей, при большей Луна сближалась бы с нашей планетой, двигаясь по спирали. Ньютон быстро произвел вычисления, предположив, что сила тяготения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, и установил, что ускорение Луны почти такое, как надо, — оно оказалось всего на одну восьмую заниженным.

Для менее крупного ученого это явилось бы потрясающим открытием, которое он постарался бы разрекламировать по всему миру всеми имеющимися в его распоряжении средствами. Ньютона оно, конечно, заинтересовало, но он был огорчен тем, что не получил лучшего результата. Лишь 16 лет спустя, когда Ньютону стали известны более точные данные и ошибка расчета уменьшилась примерно до 2%, он опубликовал свое открытие.

Много написано о присущей Ньютону неуверенности в себе. Но даже если он и предполагал действие какого-нибудь другого незначительного фактора, например декартовых вихрей, тяготение было все же для него главным фактором. Ньютон мог не так уж и беспокоиться по поводу небольшого расхождения и не добиваться уточнения, в особенности учитывая, что он намеренно использовал в своих расчетах лишь приближенные значения величин. Скорее всего, он был вполне удовлетворен тем, что решил задачу, а поскольку он знал ответ, то о чем еще ему было

беспокоиться! Такой подход полностью совпадает с поведением Ньютона во многих других случаях, когда он воздерживался от опубликования своих результатов, пока что-нибудь не наталкивало его на это.

Так в возрасте 24 лет Ньютон сделал одно из величайших открытий всех времен, установив, что тяготение является универсальной силой, действие которой распространяется на всю Вселенную. Закон всемирного тяготения можно было применить ко всей Солнечной системе, он подвел, наконец, теоретическую базу под законы, которые Кеплер с таким трудом вывел из астрономических наблюдений Тихо Браге. Вот так великий ум, опираясь на весьма слабые основания, способен выдвинуть представления далеко идущего значения.

Мы должны теперь вернуться к еще одному эксперименту Галилея, в котором он открыл свойство изохронности маятника. Может показаться, что следовало бы рассматривать открытия Галилея, соблюдая хронологический порядок. Однако это существенно повредило бы цели нашей книги, которая стремится дать систематическую картину развития физики. Учебники по необходимости должны излагать предмет систематически, иначе он будет непонятен учащемуся. Но учащемуся не нужно прививать мысль, будто физика создавалась систематическим образом. Обычно вначале появляются глубокие идеи, а впоследствии они систематически разрабатываются. Часто, в особенности на заре развития физики, какая-нибудь глубокая идея приобретала законченную форму лишь после смерти ее основоположника, так что он не мог увидеть ее торжества. Например, Галилей, несмотря на свою долгую жизнь, не дожил до того времени, когда Ньютон привел его представления в области механики в стройную, законченную систему.

Эксперимент Галилея с маятником был опять-таки внешне малозначительным событием, вроде падения ньютонова яблока: его наблюдало множество людей, но оно возбудило воображение лишь у одного человека. Галилей говорил, что он тысячи раз наблюдал, как раскачивается светильник в соборе. Капризные сквозняки могли заставить светильники колебаться с разной амплитудой, но ему всегда казалось, что период их колебаний оставался постоянным,

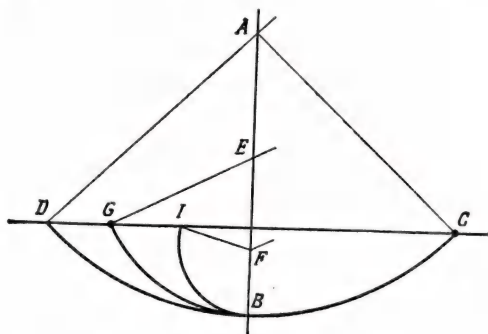
Как это можно было проверить? Требовался какой-то эталон времени, но его, разумеется, не было. Галилей воспользовался биением своего сердца — регулярным движением; до этого мог додуматься только физик. И он оказался прав: период, насколько он мог судить, был *постоянным*.

Эта история демонстрирует сразу несколько качеств блестящего ученого. Во-первых, его способность понять важное значение ничем не примечательного явления. Во-вторых, — прежде всего это касается физика, — его особенность постоянно размышлять над проблемами своей науки даже при самых неподходящих обстоятельствах. В-третьих, это изобретательность ученого в отыскании средств измерения, когда, казалось бы, ничем нельзя воспользоваться.

Галилей был доволен, обнаружив изохронность маятника. На самом деле он был больше чем доволен: впоследствии он говорил, что период оставался постоянным при изменении размаха в пределах от 90° до $4'$! (Галилей не был таким скрупулезным ученым, как Ньютон; например, он категорически утверждал, что однородный шнур, подвешенный между двумя точками, принимает форму параболы, хотя, как мы теперь знаем, это на самом деле цепная линия.) Тем не менее человеку такого масштаба, как Галилей, можно простить то, что он иногда давал себя увлечь своему энтузиазму. Устройство для отсчета времени, к которому прибег Галилей, было весьма несовершенным: частота биений сердца вполне могла возрастать в те минуты, когда ученый убедился, что его мысль подтверждается; впрочем, к тысячному измерению эмоциональное возбуждение от открытия могло уже исчезнуть!

Галилей теперь располагал объективным способом отсчета времени, с помощью которого он мог расширить эксперимент. Он нашел соотношение между периодами маятников различной длины и показал, используя грузики из свинца и пробки, что этот период не зависит от массы, хотя колебания маятника с грузиком из пробки затухают быстрее. Галилей ввел представление о резонансе, показав, что амплитуду колебаний тяжелого маятника можно постепенно увеличивать, если дуть на маятник в такт с его движением. (Он применил эти представления к изучению звука, как мы увидим в гл. 5.) Расположив гвоздь на

пути нити маятника (фиг. 2), Галилей наблюдал движение маятника с уменьшенной длиной нити и показал, что груз всегда достигает высоты, с которой он начал двигаться¹⁾. Этим Галилей заложил основы наших представлений о кинетической и потенциальной энергии. Поразительно, как одно-единственное явление вызвало в голове этого ученого целый поток идей.



Ф и г. 2. Рисунок Галилея, изображающий схему его эксперимента с маятником.

В тех случаях, когда нить AC наталкивается на гвоздь, помещенный в точке E или F , груз маятника поднимается до той же высоты (G или I), что и в отсутствие помех движению нити (D).

Результат, полученный Галилеем, имел непосредственное практическое значение. Например, им воспользовались врачи для измерения пульса больных. Он дал возможность создать механизм для регулирования хода часов, и было потрачено много изобретательности для их изготовления. Но насколько важен был этот результат для чистой физики? Дело в том, что на его основе возник способ более точно проверить постоянство g , ускорения свободного падения; и в связи с этим возник вопрос, на который до сих пор нет ответа.

Вопрос этот касается природы массы. Масса выступает в законах Ньютона в двух различных формах: во втором

¹⁾ За половину периода маятника трение в подвесе не успевало сколько-нибудь существенно проявиться и в тепло переходила лишь очень малая часть энергии маятника.— *Прим. ред.*

законе Ньютона она играет роль коэффициента пропорциональности между силой и ускорением — это инертная масса, а в законе всемирного тяготения масса фигурирует как константа, определяющая силу притяжения между двумя массами, — это гравитационная масса. Эксперимент с маятником показывает, что обе массы в точности равны друг другу. Ньютон понял важное значение этого результата; повторив опыты Галилея с большей точностью, он пришел к тем же выводам. Почему инертная масса тела равна его гравитационной массе? Этот вопрос стоит уже столетия, и мы все еще не знаем ответа на него.

Требуется сделать последний шаг, чтобы придать ньютоновскому закону всемирного тяготения законченный характер: сделать его количественным законом. Приближенно оценить значение гравитационной постоянной G можно, зная массы планет и расстояния до них, но даже массу Земли невозможно точно определить, поскольку ее плотность не поддается точному измерению. Поэтому остается измерить силу тяготения между телами, которые можно взвесить, а эта сила должна быть чрезвычайно мала. В самом деле, вес нашего тела невелик, а ведь он создается притяжением Земли — тела с очень большой массой. Можно ли надеяться измерить силу притяжения между двумя телами в лаборатории?

То, что G можно измерить в лаборатории, теперь знает каждый физик. Учебники приводят подробное описание эксперимента, проведенного Кавендишем (1731—1810). Но в них уделяют мало внимания соображениям, по которым Кавендиш выбрал конкретные размеры и другие величины в своем эксперименте, поэтому стоит попытаться оценить, насколько этот эксперимент осуществим, считая, что мы проводим его впервые.

Во-первых, найдем порядок величины силы, которую мы пытаемся измерить. Для этой цели нам требуется лишь представление о величинах, с которыми придется иметь дело. Такой расчет производится, как говорят, «по порядку величин». Подобные расчеты сыграли и продолжают играть очень важную роль в развитии физики, и все, кто изучает физику, должны уметь выполнять их.

Радиус Земли R известен, он близок к 6000 км ($6 \cdot 10^8$ см). По формуле объема шара (то, что Земля не имеет точ-

ной сферической формы, в расчетах по порядку величин совершенно несущественно) находим $\frac{4}{3}\pi R^3 \approx 2 \cdot 10^{27} \text{ см}^3$. Масса представляет собой произведение плотности на объем, а средней плотности Земли мы не знаем. Можно предположить, что она выше плотности воды, но вряд ли более чем в 10 раз, ибо столь тяжелых пород мало. Предположим, что средняя плотность составляет 5 г/см^3 . В таком случае масса Земли примерно равна $5 \cdot 2 \cdot 10^{27} \text{ г} = 10^{28} \text{ г}$.

Сила притяжения Земли, действующая на тело массы m , удаленное на $6 \cdot 10^8 \text{ см}$ от центра Земли (т. е. находящееся на поверхности Земли), равна

$$\frac{G \cdot m \cdot 10^{28}}{(6 \cdot 10^8)^2} = mg,$$

где g — ускорение свободного падения тела вблизи поверхности Земли. Таким образом,

$$g \approx \frac{G \cdot 10^{28}}{40 \cdot 10^{16}}.$$

Поскольку g известно и равно приблизительно 1000 см/с^2 , мы получаем

$$G \simeq \frac{10^3 \cdot 40 \cdot 10^{16}}{10^{28}} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ дин/см}^2 \cdot \text{г}^2.$$

Имея в виду, что результат получен по порядку величины, можно принять значение G равным 10^{-7} .

Это очень малая величина. Две массы по 1 г, отстоящие друг от друга на 1 см, притягиваются с силой 10^{-7} дин , или 10^{-10} гс , слишком малой для того, чтобы ее можно было измерить. Как увеличить эту силу? Можно взять большие массы, но тогда, очевидно, пришлось бы увеличить и расстояние между ними. Кроме того, потребовались бы более массивные опоры, что ухудшило бы возможность точно измерить малую силу. Чтобы выяснить, можно ли как следует выполнить столь тонкий эксперимент, необходимо принять во внимание все эти противоречивые соображения.

Основная идея эксперимента Кавендиша состояла в том, чтобы измерить силу, с которой неподвижное тело сферической формы притягивает подвижное. Взяв две

пары таких тел, можно создать крутящий момент и приложить его к крутильным весам. Крутильные весы представляли собой самый чувствительный из известных тогда приборов, их весьма успешно использовал Кулон (1736—1806) для измерения электростатических и магнитных сил. Мы можем упростить задачу конструирования прибора, взяв неподвижные и подвижные тела разных размеров, поскольку выбор их определяется совершенно различными соображениями.

Рассмотрим сначала подвижные тела. Они должны быть прикреплены к концам длинного поперечного стержня, подвешенного к вертикальной тонкой нити. Если подвижные тела имеют большой размер, то нить должна быть прочной и потребуется большое усилие для ее скручивания. Оказывается, лучше сделать их маленькими: проигрыш в силе тяготения будет с лихвой компенсироваться повышением чувствительности. Дело в том, что сила притяжения пропорциональна массе, которая зависит от r_1^3 , где r_1 — радиус подвижной сферы. Сечение скручиваемой нити должно быть при неизменной ее прочности пропорционально r_1^3 , и, следовательно, радиус ее пропорционален $r_1^{3/2}$. Но чувствительность скручиваемой нити ¹⁾ обратно пропорциональна четвертой степени ее радиуса, т. е. пропорциональна величине r_1^{-4} . Подобный характер зависимости более чем компенсирует проигрыш в величине r_1^3 , который получается, если взять сферы меньшего размера. Таким образом, нужно взять в качестве нити самую тонкую проволоку, какая только существует, и выбрать подвижные сферические тела такой массы, чтобы нить только-только не порвалась, когда они будут к ней подвешены.

Ну а как насчет неподвижных сфер? Если сделать их большого размера, то они будут дальше отстоять от подвижных сфер. Если их радиус равен r_2 , то массы пропорциональны r_2^3 , а расстояние от подвижных сфер будет равно примерно r_2 . Следовательно, гравитационная сила будет пропорциональна $r_2^3/r_2^2 = r_2$. Таким образом, неподвижные сферы следует сделать как можно большими.

¹⁾ То есть угол ее закручивания при том же крутящем моменте, пропорциональном силе закручивания. — *Прим. ред.*

Насколько именно большими, зависит от имеющейся аппаратуры. Изготовить сферы лучше из свинца, ибо целесообразно взять материал с очень большой плотностью. Правда, плотность свинца вдвое меньше плотности платины, но зато он дешевле. Сфера массой 50 кг, с которой мог бы справиться физически сильный человек, имеет диаметр около 20 см, и экспериментальное устройство имело бы разумные размеры. Если массы подвижных сфер порядка 100 г, то гравитационная сила близка к 10^{-2} дин — все еще чрезвычайно малая, но все же измеримая сила.

Вероятно, соображениями такого рода руководствовался Кавендиш при конструировании прибора для своего эксперимента. Мне кажется, их стоило подробно рассмотреть, ибо это превосходный пример подхода к научному эксперименту. Наше рассмотрение, разумеется, отнюдь не полное; например, проектирование легкой жесткой опоры для подвижных сфер сопряжено, вероятно, с большими трудностями, чем выбор размера самих сфер. Однако я думаю, что было приведено на первый раз достаточно деталей для иллюстрации проблем, встречающихся при проведении физического эксперимента.

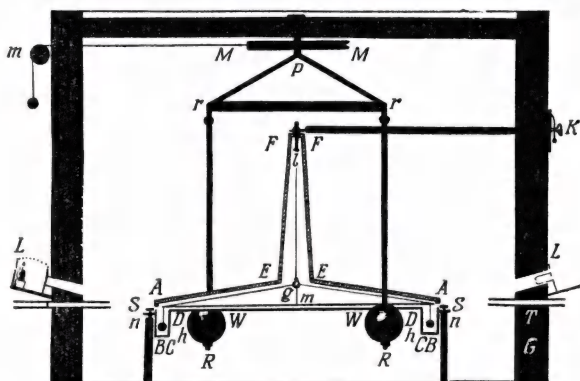
Не все знают, что эксперимент, о котором идет речь, придумал не Кавендиш. Этот эксперимент был начат Джоном Митчеллом, который построил прибор, но умер прежде, чем смог им воспользоваться, так что прибор перешел к Кавендишу. Кавендиш настолько усовершенствовал его, что фактически создал новый прибор; с его помощью он провел свой знаменитый эксперимент по измерению G , описанный в журнале *Philosophical Transactions of the Royal Society* ¹⁾ в 1798 г.

Самая большая трудность, с которой столкнулся Кавендиш, состояла в том, чтобы исключить влияние воздушных течений, поэтому он поместил свой прибор в закрытую со всех сторон камеру. На фиг. 3 воспроизведен рисунок из работы Кавендиша, на котором видна эта камера. Наблюдения отклонений велись с помощью зрительных

¹⁾ «Философские сообщения Королевского общества». В те времена естественные науки еще называли «натуральной философией». — *Прим. ред.*

труб, вставленных в стенки камеры. Модуль кручения проволоки определялся методом колебаний.

Отличительной особенностью эксперимента Кавендиша была тщательность, с какой он был поставлен, и меры предосторожности, принятые с целью исключить систематические ошибки. Результат Кавендиша — исходя из него средний удельный вес Земли был найден равным $5,48 \text{ г/см}^3$ — верен с точностью до 7%. Он имел первосте-



Ф и г. 3. Рисупок Кавендиша, изображающий прибор для определения гравитационной постоянной G .

пенное значение для физики, поскольку дал меру для определения массы планет и Солнца — первого шага к познанию Солнечной системы.

Измерение G явилось кульминационным пунктом целого ряда замечательных достижений. Как мы видели, отправной точкой для них оказывались ничем не примечательные события, над которыми большинство людей не задумывалось, тогда как для великих умов — для Галилея и Ньютона — из этих наблюдений возникали проблемы огромного значения. Но целые поколения ученых были озадачены одной фразой Ньютона: «Я не строю гипотез». Что он имел в виду?

Для естествоиспытателей это высказывание было источником величайшего смущения: разумеется, мы строим

гипотезы и проверяем их путем эксперимента. Именно так движется вперед физика. Выходит, мы должны выдвигать гипотезы, чувствуя себя виноватыми от сознания, что это вызвало бы неодобрение Ньютона? Не будем в этом, однако, «оглядываться» на Ньютона: как всякий человек, он мог иногда высказывать неправильные суждения. Повидимому, Ньютон хотел подчеркнуть, что он не делал предположений о природе тяготения. Тем не менее он был готов распространить свою теорию тяготения на всю Вселенную — столь широкую гипотезу еще никто не выдвигал. Ее нельзя проверить за пределами Солнечной системы, хотя никто не сомневается, что она верна. На самом деле заключительные страницы книги Ньютона «Оптика» полны гипотез, только они называются там не гипотезами, а вопросами. Например: «Не являются ли лучи света весьма малыми телами, которые испускаются светящимися веществами?» Ньютон умел выдвигать гипотезы, ничуть не уступая в этом отношении любому другому ученому.

2. Атмосфера

Наша планета окружена газовой оболочкой, которая чрезвычайно важна для нас. Без нее жизнь была бы невозможна, так как почти все виды живой материи зависят от кислорода — одной из главных составных частей воздуха. Атмосфера защищает нас от вредных солнечных излучений, содействует переносу водяного пара из одного района в другой. Каждая из этих функций сама по себе представляет предмет, достойный изучения, но в этой главе мы займемся лишь вопросами, исследование которых оказало влияние на развитие физики.

Современному физiku изучение атмосферы кажется совершенно естественным делом, но на заре рождения экспериментальной физики некоторые ученые относились к таким исследованиям с улыбкой. Королевское общество¹⁾, вероятно, состояло из чудаков, которым не пришло в голову ничего лучшего, чем «взвешивать воздух». Свифт, наверно, имел в виду это общество, когда описывал своих философов из Лапуты, которые пытались извлекать солнечные лучи из огурцов. Я полагаю, что нет такой формы человеческой деятельности, которую нельзя было бы представить в глупом виде, употребив подходящие слова! Каждый, кто верит в свое дело, должен иметь мужество продолжать его, какой бы злой сатире и насмешкам он ни подвергался.

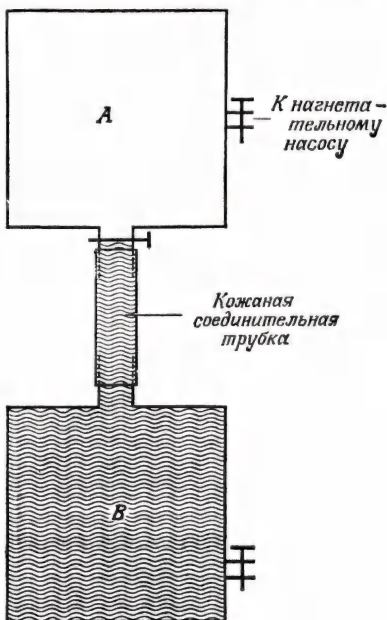
Настоящему изучению атмосферы, как и многим другим областям физики, положил начало Галилей. Он предположил, хотя это многие отрицали, что атмосфера — вид

¹⁾ Общество ученых в Англии, эквивалентное нашей Академии наук. — *Прим. ред.*

материи, и пришел к выводу, что она, будучи материальной, должна иметь вес. Галилей соглашался с Аристотелем, который считал, давая в присущей ему манере количественное выражение своим мыслям, что плотность атмосферы составляет приблизительно $\frac{1}{10}$ плотности воды.

Галилей поставил себе задачу измерить плотность атмосферы, а не просто угадать ее.

Располагая примитивным нагнетательным насосом, Галилей сумел установить, что сосуд со сжатым воздухом весит больше, чем такой же сосуд, содержащий воздух при обычном давлении. Чтобы найти плотность обычного воздуха, он придумал несколько опытов, в том числе следующий. Два сосуда *A* и *B* (фиг. 4) могут соединяться кожаной трубкой. Сосуд *A* содержит воздух при высоком давлении, сосуд *B* заполнен водой. В сосуде *B* есть также кран, через который может выходить вода. Эксперимент заключается в том, что сначала взвешива-



Ф и г. 4. Схема эксперимента Галилея для взвешивания воздуха.

ется сосуд *A*, содержащий сжатый воздух. Затем *A* соединяется с *B* и открывается кран; избыточное давление вытесняет часть воды из *B*, ее собирают и взвешивают. Затем опять взвешивают сосуд *A*.

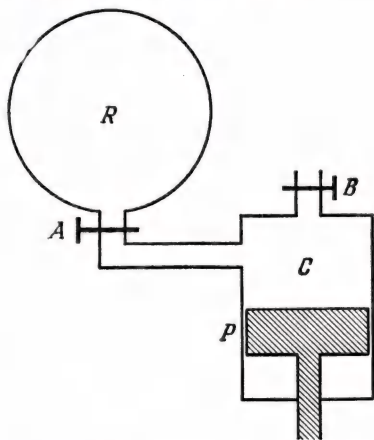
Эксперимент дает достаточно данных, чтобы определить удельный вес воздуха. Вес воздуха, который вышел из сосуда *A*, известен из двух взвешиваний этого сосуда; кроме того, мы знаем вес воды, численно равный объему вышедшего воздуха при обычном давлении. Галилей пришел к выводу, что плотность воздуха составляет $\frac{1}{400}$ плот-

ности воды — результат, верный по порядку величины: правильная цифра $\frac{1}{700}$.

Если воздух имеет вес, он должен также оказывать давление. Существование этого давления было продемонстрировано в 1654 г. в одном из самых впечатляющих физических экспериментов, проведенных к тому времени, — в эксперименте с магдебургскими полушариями.

Придумал этот эксперимент Герике (1602—1686) — богатый человек, который занимался наукой ради собственного удовольствия. Он изготовил два металлических полушария диаметром приблизительно 36 см с тщательно пригнанными друг к другу краями, которые можно было плотно соединить в сферу. Герике выкачал из сферы воздух и продемонстрировал своим знатым зрителям, среди которых был император Фердинанд III, что для отрыва полушарий друг от друга понадобились две упряжки по четыре лошади в каждой. Суммарная необходимая сила для отрыва была равна примерно 1 тс, так что на долю каждой лошади приходилось приблизительно 120 кгс — сила, которую вполне могла развить обычная лошадь.

Для откачки сферы Герике пользовался очень простым насосом. Основной принцип действия его иллюстрирует фиг. 5. Откачиваемый сосуд R соединен краем A с цилиндром C , в котором перемещается плотно прилегающий к стенкам цилиндра деревянный поршень P со смазанной маслом кожаной покрывкой. В верхней части цилиндра имеется кран B . Чтобы выкачать воздух из R , сначала закрывают кран A , открывают кран B и передвигают поршень P вверх; затем закрывают B , открывают A и опускают поршень. Теперь часть воздуха из сосуда R перешла



Ф и г. 5. Принцип действия первого воздушного насоса Герике.

в C , следовательно, давление в сосуде R понизилось. Затем опять закрывают A , открывают B , передвигают поршень кверху, и весь цикл повторяется. Поршень приводится в движение с помощью зубчатой рейки и шестерни; понижение давления в R до достаточно малой доли атмосферного давления было, по-видимому, утомительным занятием.

Примерно в это же время другие ученые были заняты экспериментами, менее эффектными, но дающими больше информации. Галилей был знаком с известным из практики странным фактом, который заключался в том, что ни один всасывающий насос не мог поднять воду на высоту более 10 м. Он мимоходом предположил, что этот факт мог быть связан с давлением, производимым атмосферой, или, выражаясь на тогдашнем жаргоне, представляет собой меру «отвращения природы к пустоте». Ученик Галилея Торричелли (1608—1647) решил проверить это предположение. Он понял, что применение более тяжелой жидкости, скажем ртути, позволило бы уменьшить его прибор до удобных размеров. В 1643 г. Вивiani, другой ученик Галилея, заполнил ртутью трубку длиной 1 м, опрокинул ее над блюдцем, в котором также была ртуть, и, к своему удовольствию, обнаружил, что столбик ртути держится на высоте приблизительно 75 см над свободной поверхностью ртути в блюдце. Это был первый барометр.

Французский ученый Паскаль (1623—1662) пришел к выводу, что барометрическое давление должно изменяться с высотой, и поднялся с барометром на колокольню церкви; никакой разницы он не заметил. Тогда Паскаль поднялся на еще большую высоту, на Пью-де-Дом в Оверни, и обнаружил, что высота ртутного столба была на несколько сантиметров меньше, чем в Париже, расположенном на уровне моря. Торричелли и сам заметил, что в разные дни атмосферное давление бывает различным; он понял, что регистрация давления может иметь определенное значение. Так было положено начало научным исследованиям атмосферы.

Но какое отношение имеет все это к фундаментальной физике? Записи барометрического давления имеют большое значение для изучения погоды, но не для самой физики. Физические законы оставались бы неизменными,

даже если бы атмосферы не существовало. Дело в том, что — я хочу здесь это показать — изучение атмосферы привело к одному из самых важных шагов в физике — к ос-нованию количественной атомной теории.

Многие люди посвятили себя ведению записей погоды и пытались найти способы предсказания погоды, а быть может, и управления ею. Один из них, Джон Дальтон (1766—1844), особенно усердно вел такие записи и занимался этим до последних дней своей жизни. Но, в отличие от усердных наблюдателей, Дальтон пытался также *понять*, какие процессы, происходящие в атмосфере, вызывали изменение атмосферного давления. Он заметил, например, что на распределение температуры оказывают влияние океаны и материки и что высокое давление обычно бывает при хорошей погоде и, наоборот, низкое — при ненастной. Дальтон считал, что с этими явлениями должно быть в значительной степени связано движение водяного пара.

Но что такое водяной пар? Мысль о том, что вещество во всех трех состояниях — газообразном, жидком и твердом — состоит из атомов, принимали многие ученые того времени, но без сколько-нибудь серьезных доказательств. Дальтон предпринял обстоятельное изучение газов. Он открыл закон, известный как закон парциальных давлений, или закон Дальтона, а также исследовал изменение растворимости жидкостей и газов с изменением давления. Опыты Дальтона были не очень точны, так как большую часть их он проводил с помощью самодельных приборов, но они имели большое значение. Дальтон пришел к выводу, что полученные им результаты можно объяснить исходя из представления об атомах, хотя и до него другие ученые рассматривали вопрос о существовании «мельчайших частиц».

Под влиянием чего выкристаллизовалась у него эта идея, точно не известно. Сам Дальтон в последующие годы по-разному рассказывал об этом разным людям. Так иногда бывает в науке: какая-нибудь идея может появиться необъяснимым образом, и сам автор ее может не знать точно, как она возникла. Пожалуй, вероятнее всего, она возникла благодаря распространению изучения газов на углеводороды, такие, как метан. Дальтон обнаружил при этом неодинаковые пропорции углерода и водорода в раз-

личных компонентах газов и пришел к выводу, что указанные свойства можно объяснить, предположив, что газы состоят из мельчайших частиц — молекул, содержащих небольшие количества еще меньших частиц, которые мы теперь называем атомами. Дальтон установил относительные веса этих атомов и, распространив свои представления на другие соединения, такие, как вода, двуокись углерода и аммиак, включил в свой список и другие атомы, например атомы кислорода и азота.

Таблица 1

«Атомные веса» Дальтона

Попробуйте восстановить формулы Дальтона для приводимых веществ по их «атомным весам»

Водород	1,00	Закись азота	13,66
Кислород	5,66	Азотная кислота	15,32
Азот	4,00	Сера	17,00
Углерод	4,50	Сернистая кислота	22,66
Вода	6,66	Серная кислота	28,32
Аммиак	5,00	Угльная кислота	15,80
Окись азота	9,66	Окись углерода	10,20

Данные Дальтона были довольно грубыми, как видно из табл. 1, а некоторые из его химических формул, например формула НО для воды, были неверны. Но переворот, произведенный Дальтоном в науке, имел фундаментальное значение. Атомная теория получила, наконец, количественное выражение.

Со времен Дальтона атомная гипотеза составляет базу всей науки. Опираясь на нее, мы строим свои представления и измеряем свойства атомов с точностью, которую Дальтон не мог даже вообразить. Мы даже «роемся» внутри атомов и обнаруживаем непредвиденную сложность их составных частей, о чем рассказано ниже (гл. 11). Некоторые из взглядов Дальтона были неверны: например, не все атомы одного и того же элемента в точности одинаковы. Но честь и слава человеку, который первым понял, как атомистическую концепцию, не воспринимавшуюся всерьез в течение 2000 лет, можно заставить жить в умах людей и сделать основой для измерений, способных двинуть науку еще дальше.

Интересно отметить, что хотя идеи Дальтона были выдвинуты в начале XIX столетия и к концу его приняты почти всеми, в XX веке некоторые ученые все еще возражали против них. Оствальд в 1904 г. и Мах в 1915 г. высказали мнение, что, поскольку так называемые атомы должны быть примерно 10^{-7} — 10^{-8} см в диаметре, как это установил В. Томсон¹⁾ (лорд Кельвин, 1824—1907), их нельзя наблюдать и они не могут оказать заметного влияния на наблюдаемые свойства вещества. Существование атомов, считали эти ученые, является не более чем удобной гипотезой. Насколько могут иногда заблуждаться даже великие люди!

¹⁾ Вывод Томсона рассмотрен на стр. 157.

3. Теплота

Теплота, несмотря на ее явную простоту и очевидный характер ее проявлений, оставалась загадкой для физики еще и тогда, когда получили уже объяснение, несомненно, значительно более сложные явления. Вплоть до середины XIX столетия многие считали теплоту своего рода материальной субстанцией, добавляемой к веществу: считалось, что нагревание тела связано с добавлением этой субстанции, известной под названием *теплорода*. Дальтон в 1802 г. рисовал схематическое изображение атомов, окружая их атмосферой из теплоты. Хотя это было примитивное представление, его можно было подтвердить экспериментально; на нем основывается составление уравнений теплового баланса. Карно (1796—1832), замечательный трактат которого «О движущей силе огня» до сих пор образует одну из основ физической науки, верил в теплород, хотя впоследствии пересмотрел свои представления.

Родственным теплороду был флогистон; как полагали, он представляет собой субстанцию, отдаваемую веществом в процессе горения. Флогистон в отличие от теплорода можно было измерять, но возникла трудность, заключавшаяся в том, что вес флогистона оказывался то отрицательным, то положительным. Теория флогистона была явно противоречивой и продолжала существовать только потому, что никто не мог придумать ничего лучшего. В этой главе мы рассмотрим этапы экспериментальных исследований, которые прошла в своем развитии современная теория тепла.

Первый шаг сделал Румфорд (1753—1814) в конце XVIII столетия. Идея опыта возникла опять-таки из самого обыч-

ного наблюдения, которое, наверное, делали многие до Румфорда, но не придавали ему особого значения. Речь идет о теплоте, возникающей при сверлении отверстия в куске металла. Румфорд, в частности, занимался сверлением пушечных стволов в военной мастерской в Мюнхене и заметил, что температура металла очень сильно повышается. Откуда бралась теплота? Источников теплорода, очевидно, не было.

Одно из предположений заключалось в том, что мелкие металлические стружки, образующиеся при сверлении, обладали меньшим сродством к теплороду, чем массивный металл, в котором сверлили отверстие. Таким образом, при сверлении металла выделяется теплород, в результате чего происходит повышение температуры. Румфорд придумал простой способ проверить это предположение. Если взять тупое сверло, рассуждал он, то стружек образуется мало и повышение температуры должно быть меньше. Румфорд проделал опыт: температура поднялась еще выше. Очевидно, теория теплорода не годилась.

Румфорд вспомнил более ранние теории Бойля и других ученых, согласно которым теплота связана с колебаниями частиц. Дальнейшие опыты убедили его в том, что теплота может создаваться без ограничений, и в конечном счете он высказал смелое утверждение, что «теплота есть ДВИЖЕНИЕ» (это слово выделил сам Румфорд).

Это утверждение часто приводят как свидетельство большой проницательности Румфорда. Может быть, это и так, но оно свидетельствует также о большой осторожности. Какого рода движение представляет собой теплота? Как оно получается? Что происходит с этим движением, когда тело остывает? Ни одного из этих вопросов Румфорд не поставил и, естественно, не дал на них ответа.

Но Румфорд сделал крупный шаг вперед, предположив, что теплота — это некое свойство самого вещества, а не что-то добавляемое к нему.

Дэви (1778—1829) произвел в Лондоне опыт, условия которого были в большей степени подчинены воле экспериментатора. Он сложил вместе два куска льда, поместил их в сосуд, из которого был выкачан воздух, и привел их во взаимное трение при помощи часового механизма. Выделилось достаточное количество тепла, чтобы расплавить

часть льда, и эта теплота не могла взяться из теплорода воздуха.

Так был сделан первый важнейший шаг: было установлено, что теплота есть форма кинетической энергии. Следующий необходимый шаг состоял в том, чтобы выяснить, существует ли какое-нибудь количественное соотношение между теплотой и механической энергией. Для проведения таких исследований требовалось, однако, значительно больше информации. Нужно было знать тепловые свойства материалов, в частности знать, насколько повышается температура различных материалов при подведении к ним тепла. Это свойство выражается так называемой удельной теплоемкостью — количеством тепла, которое требуется, чтобы повысить температуру единицы массы на один градус.

Очевидно, необходимо было выработать общее соглашение относительно того, что понимать под градусом температуры, поскольку ранее было предложено несколько температурных шкал. Природа теплоты была еще неизвестна, и шкалы могли быть лишь произвольными. Шкала, которую можно было бы принять, должна обладать двумя важными качествами: она должна быть как можно более точно определена и легко воспроизводима. По этой причине некоторые предложения, такие, как предложение Фаренгейта, выдвинутое им примерно в 1720 г., были неприемлемыми. (Фаренгейт предложил принять в качестве двух фиксированных точек шкалы температуру замерзания какой-нибудь смеси и температуру человеческого тела.) В 1742 г. Цельсий предложил использовать точки кипения и замерзания воды и приписал первой значение нуль, а второй 100° . Эта шкала — перевернутая! — теперь повсеместно принята и называется стоградусной шкалой; недавно пришли к общему соглашению называть ее шкалой Цельсия. Что касается шкалы Фаренгейта, то ею по-прежнему пользуются во многих научных исследованиях, хотя она определена по-новому: точка замерзания воды в этой шкале принята за 32° , а точка кипения воды — за 212° .

Располагая точными температурными шкалами, ученые в различных частях мира могли сравнивать свои результаты. Первые измерения удельной теплоемкости произ-

вел Блэк (1728—1799); его работа опередила эксперименты Румфорда и Дэви, но так как Блэк излагал свои идеи главным образом на лекциях, они были полностью опубликованы лишь после его смерти. Дэви был смелее Румфорда и высказал предположение, что теплота — это «своеобразное, вероятно, колебательное движение мельчайших частиц тел». Его ответ был правильным. Насколько редко встречаются такие люди! Блэк со своим сотрудником Мартином налил равные объемы воды и ртути в одинаковые сосуды, поместил их на равных расстояниях от огня и наблюдал за скоростью повышения температуры воды и ртути. Блэк был в полной уверенности, что температура ртути будет повышаться медленнее, чем воды, так как масса ртути в 13,5 раза больше. Представьте себе его удивление, когда он увидел, что температура ртути повышалась вдвое быстрее. Блэк обнаружил, что ртуть имеет малую удельную теплоемкость — примерно $\frac{1}{27}$, или 0,037 удельной теплоемкости воды; как мы теперь знаем, это значение равно 0,033.

Находятся люди, которые считают, что у ученого не должно быть никакой предвзятой идеи относительно исхода его эксперимента; ученый, говорят они, должен быть совершенно объективным. Это вздор. Настоящий ученый почти всегда ставит эксперименты с целью проверить ожидаемые результаты. Он испытывает удовольствие, обнаружив то, что ожидал, и разочарование, когда результаты эксперимента не совпадают с ожидаемыми. Если же ученый ничего не ожидает получить, то он не может быть вполне уверен в значимости своих результатов. Все значительные достижения науки в первый момент субъективны; объективными они становятся тогда, когда ученый записывает результаты исследований в форме, допускающей принятие и проверку любым другим исследователем.

Следует заметить, что для измерения удельных теплоемкостей необязательно знать природу теплоты, необходимо лишь определить единицу теплоты. Современная единица теплоты — калория — была настолько логически естественным следствием введения шкалы Цельсия, что принятию ее не отводится сколько-нибудь значительное место в истории науки. Измерение же теплоты — дело чрезвычайно важное как с научной, так и с технической

точки зрения; но если иметь в виду опыт Джоуля, о котором вскоре пойдет речь, то сомнительно, чтобы калория надолго сохранилась как единица, употребляемая в науке.

Эксперимент Блэка и Мартина зажег многих других ученых, которые начали придумывать более точные методы и ставить опыты со множеством других веществ. К 1819 г. двое французов, Пти (1791—1820) и Дюлонг (1785—1838), собрали достаточно данных, чтобы сделать общий вывод: удельные теплоемкости химических элементов — не случайные величины, а связаны простым образом с атомными весами элементов.

Некоторые смотрят свысока на процесс сбора эмпирических данных, который Резерфорд позднее назвал «коллекционированием марок». Эта работа в сущности подходит для тех, кто не обладает творческим умом, но может научиться методам исследования и имеет достаточное терпение, чтобы тщательно выполнять эксперименты. Может быть, это, так сказать, научная деятельность «второго порядка», но она тем не менее играет огромную роль в развитии науки. Сказанное относится и к работе Пти и Дюлонга, которые поставили перед собой задачу измерить удельные теплоемкости как можно большего числа твердых химических элементов.

Метод Пти и Дюлонга был основан на измерении скорости охлаждения веществ. Если некоторые количества вещества поместить в одинаковые сосуды и нагреть, то скорость последующей потери ими тепла должна зависеть только от превышения температуры нагретого вещества над температурой окружающей среды. Поэтому, сравнивая скорости изменения температуры различных веществ, можно сопоставлять их удельные теплоемкости. Следует отметить, что в этом методе можно не принимать во внимание закон охлаждения Ньютона — одно из полученных им не очень известных соотношений, — пока сопоставляются скорости охлаждения двух тел от одной и той же температуры.

Результаты экспериментов Пти и Дюлонга обнаружили такую закономерность: чем тяжелее элемент, тем меньше его удельная теплоемкость. В настоящее время понятие атома прочно заняло свое место в системе наших знаний и разработаны методы измерения атомных весов,

гораздо более точные, чем те, которыми пользовался Дальтон. Поскольку плотность возрастает в той или иной степени вместе с атомным номером, Дюлонг и Пти попробовали помножить удельную теплоемкость на атомный вес и обнаружили замечательное постоянство их произведения, как показывает приводимая ниже табл. 2. Атомные веса в ней взяты по отношению к атомному весу кислорода, принятому за единицу. Если считать атомный вес кислорода равным 16, как принято в настоящее время, то произведение, о котором идет речь, примет известное значение 6,0, называемое «атомной теплоемкостью».

Таблица 2

Атомные веса элементов, взятые по отношению к атомному весу кислорода, который принят за единицу

Химический элемент	Удельная теплоемкость	Относительный атомный вес	Произведение
Висмут	0,0288	13,30	0,3830
Свинец	0,0293	12,95	0,3794
Золото	0,0298	12,43	0,3704
Платина	0,0314	11,16	0,3740
Олово	0,0514	7,35	0,3779
Серебро	0,0557	6,75	0,3759
Цинк	0,0927	4,03	0,3736
Теллур	0,0912	4,03	0,3675
Медь	0,0949	3,957	0,3755
Никель	0,1035	3,69	0,3819
Железо	0,1100	3,392	0,3731
Кобальт	0,1498	2,46	0,3685
Сера	0,1880	2,011	0,3780

Прежде чем рассматривать значение этого результата, проанализируем цифры, приведенные в табл. 2. Удельные теплоемкости большинства химических элементов, кроме теллура и кобальта, находятся в приемлемом согласии с современными значениями. Большинство атомных весов также правильны, опять-таки кроме теллура и кобальта. В чем же дело?

Мы можем лишь предположить, что Пти и Дюлонг работали не с теми материалами, как они думали. Они занимались своими исследованиями в то время, когда атомная теория находилась еще в младенческом возрасте — ей было

меньше 20 лет — и когда было много неясностей относительно того, какие вещества являлись *химическими элементами*. Теллур был открыт в 1782 г., а селен, находящийся в близком химическом родстве с ним, — в 1817 г., всего за два года до эксперимента Пти и Дюлонга. Возможно, они работали с селеном, а не с теллуром: согласие результатов при этом значительно лучшее. С кобальтом дело обстоит сложнее. Атомный вес этого элемента около 40; трудно представить себе, какой химический элемент — металл с близким атомным весом — можно спутать с кобальтом. Поэтому кобальт остается загадкой.

Закономерность, которую нашли Пти и Дюлонг, проверялась более точными современными калориметрическими методами; ей подчиняется большинство химических элементов. Что она означает? Во многих элементарных учебниках ее довольно странным образом трактуют как некий курьезный результат, который помогает химикам устанавливать атомные веса элементов. На самом деле эта закономерность имеет гораздо большее значение: она представляет собой первое обобщение в физике твердого тела и является примером одного важного физического принципа, который мы рассмотрим ниже, когда будем рассказывать об эксперименте Джоуля по определению количественного соотношения между теплотой и механической энергией.

Теперь мы должны рассказать о другом замечательном открытии Блэка — о скрытой теплоте. Блэк пришел к этому понятию в результате наблюдения самого обычного явления, известного с незапамятных времен, — таяния снега в конце зимы. Блэк понял исключительно важное практическое значение этого явления: если бы снег полностью таял, как только температура воздуха достигала точки таяния льда, то возникали бы колоссальные опустошительные наводнения. Он пришел к выводу, что на таяние снега должна затрачиваться теплота, причем температура снега при таянии не должна меняться. Блэк назвал эту теплоту «скрытой теплотой». Он проверил свою гипотезу экспериментально, расположив одинаковые массы воды и льда около одного и того же источника тепла. Оказалось, что температура воды неуклонно повышалась, тогда как температура льда оставалась неизменной, пока

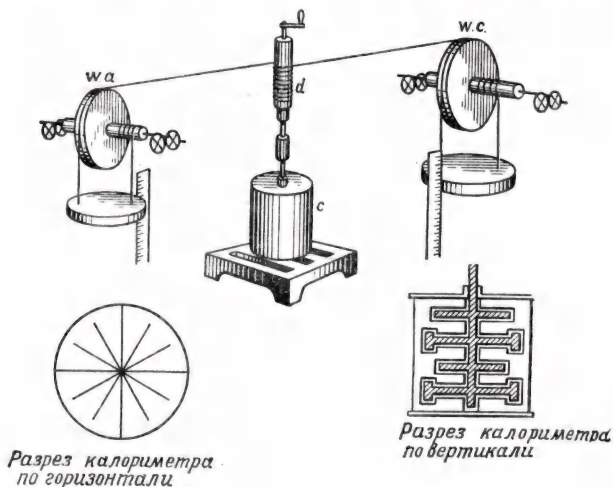
лед весь не растаял. Блэк проделал измерения скрытой теплоты таяния льда и кипения воды и нашел, что количество теплоты, необходимое, чтобы испарить некоторую массу воды, в четыре раза больше того, которое требуется, чтобы повысить температуру этой массы воды от точки замерзания до точки кипения. Мы знаем теперь, что даже эта большая цифра занижена.

Пользуясь понятиями удельной теплоемкости и скрытой теплоты, мы можем придать учению об измерении теплоты — калориметрии — количественный характер и попытаться увязать представления Румфорда и Дэви с механикой Ньютона. Сейчас эта идея может показаться нам очевидной, но в начале XIX столетия это было не так. В 1842 г. Майер, исходя из теоретических соображений, высказал предположение, что должно существовать прямое количественное соотношение между теплотой и механической энергией. В эксперименте этот факт, не оставив в нем больше никаких сомнений, установил Джоуль (1818—1889); он опубликовал свою первую работу на эту тему в 1843 г.

Интерес к этой теме впервые возник у Джоуля из знакомства с электрическими машинами, которые только что были изобретены. Джоуль был человеком весьма практического склада ума, и его увлекала идея создать вечный источник энергии. Он изготовил вольтову батарею, запустил от нее примитивный электрический двигатель собственной конструкции и увидел, что получить нечто из ничего не удастся: цинк в батарее съедался и замена его обходилась довольно дорого. (Позже Джоуль доказал, к своему собственному удовольствию, что прокормить лошадь всегда дешевле, чем менять цинк в батареях, так что лошадь никогда не будет вытеснена электродвигателем.) Это побудило Джоуля исследовать связь между теплотой и энергией всех видов, и он решил выяснить, существует ли точное количественное соотношение между теплотой и механической энергией.

Джоуль посвятил этой идее большую часть своей жизни. Он также задался целью измерить возможно точнее коэффициент пропорциональности в этом соотношении (механический эквивалент теплоты). Он сумел приблизительно оценить значение этой величины из опытов Румфорда,

который зафиксировал, насколько повысилась температура известной массы вещества, когда с помощью лошадиной упряжки сверлили металл пушечного ствола тупым сверлом. Поскольку Румфорд не учитывал потери тепла, результат, очевидно, должен был быть завышен, но это не имело значения. Эффект сам по себе весьма велик, поэтому о тонких измерениях речь не идет, но очень важно



Ф и г. 6. Прибор Джоуля для определения механического эквивалента теплоты.

точно измерять температуру и исключить систематические ошибки. Наиболее известный опыт Джоуля заключается в перемешивании воды стержнем с лопатками, который приводится во вращение.

Схема опыта показана на фиг. 6. Цилиндр насажен на деревянный стержень (чтобы предотвратить потери тепла путем теплопроводности), на котором укреплено несколько лопаток. Он приводится во вращение парой сил, создаваемой двумя гири. Лопатки перемешивают воду в калориметре, в который вставлены перегородки, имеющие вырез, соответствующий форме лопаток, так что лопатки вращаются в нем с небольшим зазором. Гири опускаются, проходя определенное расстояние, и можно вычислить

теряемую ими потенциальную энергию. Необходимо также учитывать кинетическую энергию гирь в нижней точке их опускания. В опыте регистрируется повышение температуры воды в калориметре и вводится поправка на охлаждение ее в течение опыта.

Поскольку повышение температуры воды было невелико, Джоуль сделал так, чтобы можно было отсоединять цилиндр, поднимать гири и снова опускать их. После 10—20 опусканий гирь за период около 1 ч температура воды повышалась всего примерно на $0,5^{\circ}\text{C}$, но Джоуль пользовался достаточно хорошим термометром и получил результат, который совпадает со значением, принятым в настоящее время, $4,18 \cdot 10^7$ эрг/кал с точностью до 0,5%. Другие методы Джоуля давали согласующиеся между собой результаты; он достиг своей цели, доведя работу действительно до конца. Единица энергии — джоуль — справедливо названа в его честь.

Теперь мы сможем яснее понять значение результата, полученного Пти и Дюлонгом: при данной температуре каждый атом обладает в среднем одинаковым количеством энергии. Это частный случай одного из замечательных общих принципов в физике — принципа равнораспределения энергии по степеням свободы, сформулированного впервые Больцманом (1844—1906): если система обладает несколькими степенями свободы, то ее энергия распределяется в среднем поровну между ними. Степень свободы означает некоторый способ, посредством которого система может использовать энергию, совершая механическое движение. Например, если груз маятника подвешен на длинной пружине, то он обладает несколькими степенями свободы: он может совершать колебания из стороны в сторону, вперед-назад (комбинации этих колебательных движений не означают новых степеней свободы); груз также может двигаться вверх-вниз, растягивая и сжимая пружину; кроме того, пружина может совершать крутильные колебания. Принцип Больцмана утверждает, что в среднем за время, большое по сравнению с периодами всех этих колебаний, на все типы колебаний приходятся равные доли энергии.

Дюлонг и Пти были в восторге от своих результатов и считали, что при более точных измерениях произведение

атомного веса на удельную теплоемкость — атомная теплоемкость — должно быть *в точности постоянным*. Они были бы разочарованы, если бы взяли для своих исследований такие элементы (как, например, углерод), у которых атомная теплоемкость значительно меньше. Это расхождение и, разумеется, некоторые другие теперь, как известно, получили объяснение. Дело в том, что принцип Больцмана справедлив, если только энергия непрерывна. Как бы ни были малы количества энергии, этот принцип требует, чтобы энергия могла делиться между несколькими степенями свободы. Если же по той или иной причине энергия существует в виде порций — точно так же, как вещество не является непрерывным, а состоит из атомов, — то принцип Больцмана не может строго выполняться. Так расхождения, обнаруженные учеными одного поколения, приводят к открытиям в следующем поколении.

Труды Блэка, Джоуля, Дюлонга и Пти убедили физиков в том, что теплота представляет собой форму кинетической энергии. Атомы находятся в постоянном движении. Есть ли какая-нибудь возможность увидеть это движение? Атомы, как об этом сказано на стр. 157, слишком малы, чтобы их можно было увидеть под микроскопом (стр. 95). Но давайте введем в жидкость какие-нибудь частицы, которые находились бы в ней во взвешенном состоянии и которые можно было бы увидеть; попытаемся выяснить, достаточно ли энергии сообщается частицам, чтобы сделать тепловое движение видимым. Принцип равнораспределения энергии гарантирует, что эти частицы получают свою причитающуюся им долю энергии, и если они достаточно малы, то их движение можно будет увидеть под микроскопом с большим увеличением.

Чтобы выяснить, возможен ли такой эксперимент, нам придется сделать довольно много предположений. Предположим, что линейный размер наших частиц превышает размеры атомов или молекул более чем в тысячу раз, так что масса частиц будет примерно в 10^{10} раз больше. Какова энергия, которую должны получить частицы? Мы можем лишь приблизительно оценить ее, ибо не знаем масс атомов или уровень энергии, от которого будем вести измерения. Но приращение температуры, равное 100°C , соответствует приращению кинетической энергии 1 г вещества с плот-

ностью, равной единице, порядка $10^2 \cdot 4 \cdot 10^7$ эрг; мы можем принять эту энергию равной 10^{10} эрг. В соответствии с оценкой размеров атома, данной Томсоном (стр. 157), в 1 г вещества содержится примерно 10^{24} атомов, и, таким образом, каждый атом обладает энергией около 10^{-14} эрг.

Это очень малая величина, но ведь и частицы, которым сообщается такая энергия, также малы. Какие должны быть скорости у этих частиц, чтобы они обладали такой энергией? Исследования Галилея (стр. 12), как мы видели, показывают, что если к покоящемуся телу приложена сила, которая перемещает его на определенное расстояние, то время перемещения тела пропорционально корню квадратному из этого расстояния, и можно показать, что скорость в конце отрезка пути также пропорциональна этому квадратному корню. Если мы определим работу как произведение силы на путь, на котором эта сила действует, а энергию как свойство тела, приобретенное им в результате того, что над ним произведена работа, то энергия должна быть пропорциональна квадрату скорости тела. Действительно, можно показать, что энергия тела массы m , движущегося со скоростью v , равна $\frac{1}{2} mv^2$.

Таким образом, если масса взвешенных частиц примерно в 10^{10} раз больше массы атома, т. е. порядка 10^{-14} г, то скорость каждой частицы приближенно определяется выражением

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-14} \text{ эрг}}{10^{-14} \text{ г}}},$$

или чуть больше 1 см/с. Такую скорость, разумеется, вполне можно наблюдать.

В результате подобных рассуждений Эйнштейн (1879—1955) пришел в 1905 г. к выводу, что следует попытаться обнаружить такое явление. Он не знал, что оно уже открыто и объяснено. В 1827 г. ботаник Броун (1773—1858) наблюдал беспорядочное движение частичек цветочной пыльцы, взвешенных в воде. Частицы у Броуна были намного больше тех, о которых шла речь выше, они имели примерно $5 \cdot 10^{-4}$ см в длину и несколько меньше в ширину. Поразительно, что Броуну удалось наблюдать это движение: он пользовался всего лишь одной линзой с фокусным расстоянием 0,8 мм. Броун подумал сначала, что наблюдаемое им

движение представляет собой какую-то форму проявления жизни, но он наблюдал его и в опыте с высушенной пылью, а потом с неорганическими частицами, в том числе с частицами измельченного материала, из которого сделан сфинкс! Это явление, известное под названием броуновского движения, было правильно объяснено в 1876 г. Рамзаем (1852—1916).

Мы далеко ушли от ранней поры теплорода и флогистона. Теплота — это проявление механической энергии, и задачи теплоты можно свести к задачам механики ¹⁾. Единственная трудность такого сведения состоит в том, что системы, с которыми нам приходится иметь дело, содержат так много частиц, что изучение их движения по отдельности невозможно: даже задача трех тел до сих пор не поддается точному решению. Однако, имея дело с большим числом частиц, можно пользоваться статистическими методами и получать вполне точные результаты. Предмет статистической термодинамики выходит за рамки нашей книги, посвященной экспериментальным методам, но все же интересно было бы показать, как эта область физики развилась из простых наблюдений экспериментаторов, обладающих живым воображением.

¹⁾ Это не совсем точно. Та «единственная трудность» сведения теплоты к механике означает по существу важнейшее качественное различие между этими обоими видами движения.— *Прим. ред.*

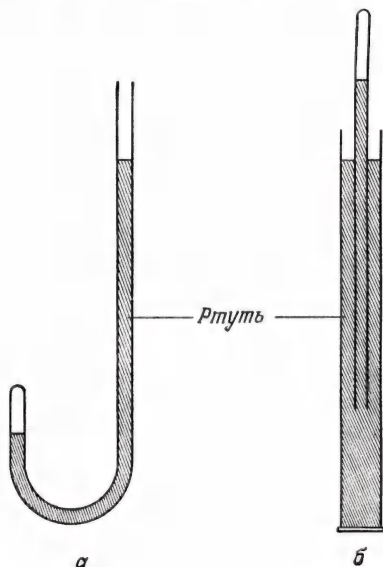
4. Газы

В гл. 2 и 3 соответственно мы рассматривали свойства конкретной газовой смеси — атмосферы — и постепенную эволюцию представлений о природе теплоты. В этой главе мы сведем обе темы воедино и получим первое важное обобщение в физике — газовые законы.

Газовые законы настолько просто выражаются одним-единственным уравнением, что эта простота как бы заслоняет замечательные выводы, которые они позволяют сделать. Можно подумать, что любое обобщение, если оно выглядит слишком просто, не заслуживает внимания. Это неверно. Одна из целей физики заключается в поиске таких закономерностей, которые выражают какое-то общее свойство природы. Они углубляют наши познания и создают основу для дальнейшего продвижения вперед. Газовые законы помогли уяснить истинную природу газообразного состояния и дать фундаментальное определение температуры. Кроме того, они позволили лучше понять гораздо более сложную природу твердого и жидкого состояния.

Первый газовый закон был опубликован в 1660 г. Бойлем (1627—1691) в работе «Новые эксперименты, касающиеся воздушной пружины». Бойль был одним из первых членов Королевского общества и блестящим экспериментатором. Рассказывают, будто единственной причиной боязни смерти у Бойля была перспектива вступить в жизнь, в которой все заранее известно и не будет надобности заниматься экспериментами. Он заинтересовался работами Торричелли и Герике и значительно усовершенствовал воздушный насос последнего. Бойлю казалось, что для понимания принципа действия этого насоса необходимо

знать, как меняется объем данного количества воздуха в зависимости от давления, и он изобрел несколько довольно простых приборов, чтобы произвести необходимые измерения. По существу его работа распадалась на две разные части, отвечающие измерениям при давлениях выше и ниже атмосферного.



Фиг. 7. Принцип устройства прибора Бойля, с помощью которого было установлено соотношение между давлением и объемом данной массы газа.

a — для давлений больше атмосферного, *б* — для давлений меньше атмосферного.

Первая часть опытов была довольно проста. Бойль взял очень длинную изогнутую стеклянную трубку (фиг. 7, *a*) и налил в нее ртуть, так что в коротком отростке оказался запертым небольшой объем воздуха. Длина воздушного столба служила мерой его объема. Уровень ртути в обоих отростках первоначально был одинаковым. Бойль затем начал доливать ртуть в длинный отросток, пока объем воздуха не уменьшился вдвое, и к большому своему удовольствию отметил, что разность между обоими уровнями ртути примерно равна барометрическому давлению. Это наводило на мысль об обратной зависимости между давлением

и объемом; для получения этой зависимости Бойль повторил опыт, доливая ртуть небольшими порциями, и полученные им данные полностью подтвердили такую зависимость.

Бойль понимал, однако, что нужно провести эксперимент и в области давлений ниже атмосферного, а для этого требовалась более сложная аппаратура. Он взял трубку длиной примерно 2 м и поместил ее в более широкую трубку, наполненную ртутью (фиг. 7, *б*). Нагревая и охлаждая

внутреннюю трубку. Бойль втянул в нее ртуть, и в конечном счете в верхней части трубки остался небольшой объем, занятый воздухом. Затем он постепенно поднимал внутреннюю трубку так, что давление в ней понижалось, и опять измерял давление и объем. Таким путем он сумел перекрыть широкий диапазон давлений, даже более широкий, чем удастся перекрыть сегодняшним школьникам с помощью учебного прибора для проверки закона Бойля. В табл. 3а и 3б даны некоторые из результатов в том виде, как они приводятся Бойлем.

Поучительно все же представить результаты Бойля графически так, как это делают теперь. На фиг. 8 показан график зависимости обратных величин объема от давления (график а). График представляет собой почти идеальную

Таблица 3а

Таблица результатов Бойля для сжатия воздуха

(Атмосферное давление = $29\frac{1}{8}$ дюйма)

Объем в произвольных единицах	Избыточное давление в дюймах ртутного столба	Давление	Давление согласно предположению Бойля
48	0	$29\frac{2}{16}$	$29\frac{2}{16}$
42	$4\frac{6}{16}$	$33\frac{8}{16}$	$33\frac{1}{7}$
36	$10\frac{2}{16}$	$39\frac{4}{16}$	$38\frac{7}{8}$
30	$17\frac{15}{16}$	$47\frac{1}{16}$	$46\frac{3}{5}$
24	$29\frac{11}{16}$	$58\frac{13}{16}$	$58\frac{2}{8}$
21	$37\frac{15}{16}$	$67\frac{1}{16}$	$66\frac{4}{7}$
18	$48\frac{12}{16}$	$77\frac{14}{16}$	$77\frac{2}{3}$
15	$63\frac{15}{16}$	$93\frac{1}{16}$	$93\frac{1}{5}$
12	$88\frac{7}{16}$	$117\frac{9}{16}$	$116\frac{4}{8}$

Таблица 36

Таблица результатов Бойля для разрежения воздуха

(Атмосферное давление = $29\frac{3}{4}$ дюйма)

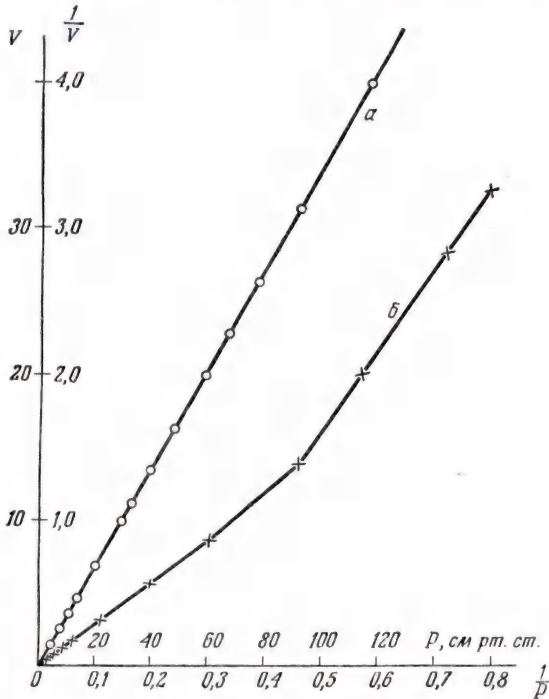
Объем в произвольных единицах	Разность давлений в дюймах ртутного столба	Давление	Давление согласно предположению Бойля
1	0	$29\frac{3}{4}$	$29\frac{3}{4}$
$1\frac{1}{2}$	$10\frac{5}{8}$	$19\frac{1}{8}$	$19\frac{5}{6}$
2	$15\frac{3}{8}$	$14\frac{3}{8}$	$14\frac{7}{8}$
3	$20\frac{2}{8}$	$9\frac{4}{8}$	$9\frac{11}{12}$ *
6	$24\frac{7}{8}$	$4\frac{7}{8}$	$4\frac{23}{24}$
9	$26\frac{3}{8}$	$3\frac{3}{8}$	$3\frac{11}{36}$
14	$27\frac{4}{8}$	$2\frac{2}{8}$	$2\frac{1}{8}$
20	28	$1\frac{6}{8}$	$1\frac{9}{80}$
28	$28\frac{3}{8}$	$1\frac{3}{8}$	$1\frac{1}{16}$
32	$28\frac{4}{8}$	$1\frac{2}{8}$	$\frac{119}{128}$

* Это значение было ошибочно приведено Бойлем в 1662 г. равным $9\frac{15}{12}$.

Несмотря на абсурдность такой записи, ошибка с тех пор воспроизводилась во многих книгах. Но разве это самая продолжительная история повторения ошибок в науке?

прямую, проходящую через начало координат. А что если построить зависимость объема от обратных величин давления? Как видно из графика б, в этом случае вблизи начала координат (точек слишком много, чтобы нанести их все) обнаруживается значительное отклонение от линейной зависимости. Эти отклонения нелегко объяснить. Они не вызваны ошибками измерения объема, которые должны быть наибольшими для малых объемов; Бойль вряд ли мог допустить ошибку на $\frac{1}{4}$ дюйма в атмосферном давлении. Результаты Бойля в области низких давлений

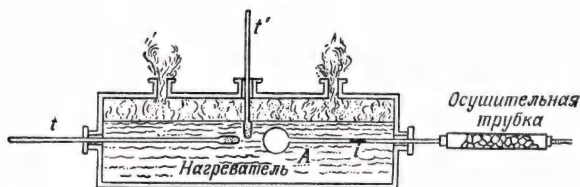
на самом деле не очень хороши: значение $119/128$ дюйма плохо согласуется с действительным значением $12\frac{1}{8}$ дюйма. Все результаты Бойля при низких давлениях обнаруживают систематическую ошибку, и ее не удается отчетливо выявить, используя те грубые дроби, которые брал Бойль.



Ф и г. 8. Графики зависимости $1/V$ от p (а) и V от $1/p$ (б), построенные по результатам Бойля.

Закон Бойля был заново открыт в 1676 г. французом Мариоттом (1620—1684), и во Франции этот закон до сих пор называется законом Мариотта. Приоритет Бойля, по-видимому, не вызывает сомнения, но Мариотт глубже понимал фундаментальное значение этого результата, тогда как Бойль считал его просто еще одним интересным свойством воздуха.

Следующим очевидным шагом было измерить расширение воздуха при нагревании; строго говоря, провести такие измерения можно было бы при наличии подходящей температурной шкалы. Но, конечно, физики не могли ждать появления идеальной температурной шкалы. Вместо этого они начали работать с приближенной шкалой, наблюдая расширение ртути в стеклянной трубке. Мы знаем, что это был удачный выбор, значительно лучший, чем, скажем, если заполнить стеклянную трубку водой.



Фиг. 9. Прибор Гей-Люссака для определения расширения газов при постоянном давлении.

В 1801 г. Дальтон, по-видимому, впервые произвел удовлетворительные измерения; выполненные другими исследователями измерения были неточны из-за присутствия паров воды. Он взял несколько газов — кислород, азот, водород и углекислый газ — и, тщательно высушив их, поместил в запаянные трубки с делениями и запер ртутной каплей. Трубки нагревались водой, пропускавшей между трубками и специальной рубашкой, окружавшей их. К своему удивлению, Дальтон обнаружил, что все газы вели себя одинаково.

Дальтон сформулировал полученные им результаты в чрезвычайно осторожной форме: «В общем я не вижу достаточной причины, мешающей нам заключить, что все «упругие» газы при одном и том же давлении одинаково расширяются при нагревании». Он считал, однако, что способность расширяться уменьшается по мере повышения температуры.

Гей-Люссак (1778—1850) сформулировал тот же вывод более определенно и притом в количественной форме. Прибор, которым он пользовался, показан на фиг. 9. Газ, тщательно осушенный, содержится в баллончике А, в

трубке находится капля ртути, запирающая газ. Трубка расположена горизонтально, поэтому изменение давления при расширении не происходит. Температуру можно отсчитывать по двум термометрам.

Гей-Люссак определял объем газа при различных значениях температуры в пределах от точки замерзания до точки кипения воды, вводя поправку на нагреваемую часть трубки. Он исследовал ряд газов и получил следующие результаты для коэффициента расширения $(^{\circ}\text{C})^{-1}$ при атмосферном давлении:

Воздух	0,003671	CO ₂	0,003710
Водород	0,003661	CO	0,003669
Оксид азота	0,003720	SO ₂	0,003903
Циан	0,003877		

Среднее значение равно $0,003744 (^{\circ}\text{C})^{-1}$, разброс — порядка 4%.

Гей-Люссак распространил свои исследования на пары эфира; вставив в свой нагревательный сосуд две одинаковые трубки и сравнивая поведение паров эфира и воздуха, он не обнаружил заметной разницы в их поведении. Гей-Люссак сформулировал тогда следующие выводы:

1. Все газы и все пары одинаково расширяются при одном и том же повышении температуры.

2. Для постоянных газов ¹⁾ увеличение объема каждого из них в пределах от температуры таяния льда до температуры кипения воды равно $100/26666$ первоначального объема.

Эти утверждения настолько более определены, чем высказывание Дальтона, что теперь закон о тепловом расширении газов не называют именем Дальтона. Но Гей-Люссак с благородством, к сожалению, редко встречающимся в науке, настоял, чтобы этот закон назывался в честь Шарля (1746—1823), который получил те же результаты в 1787 г., но не опубликовал их. Таким образом, этот закон теперь называют законом Шарля, хотя в некоторых странах он все еще известен как закон Гей-Люссака ²⁾.

¹⁾ Постоянными газами во времена Гей-Люссака в отличие от паров считали не сжижающиеся газы. Впоследствии удалось получить достаточно низкие температуры для сжижения и этих газов. — *Прим. ред.*

²⁾ В частности, так он называется и у нас. — *Прим. перев.*

Существует одно важное следствие из этого результата — понятие абсолютного нуля. Если температура опускается ниже 0°C , то объем газа будет продолжать сокращаться и должен при некоторой температуре, не зависящей от природы газа, в идеале обратиться в нуль. Эта температура должна поэтому иметь какое-то принципиальное значение. Дальтон понимал это и строил предположения относительно этого «уровня абсолютного холода». Вследствие некоторых необоснованных гипотез он получил значение -840°C . Гей-Люссак, основываясь на найденной им закономерности, получил значительно более высокую температуру -267°C , очень близкую к действительному значению.

Понятие абсолютного нуля температуры имеет огромное значение для большей части физики. В первое время эту температуру рассматривали как такую, при которой тело теряет всю свою теплоту, т. е. если пользоваться кинетической теорией (стр. 155), то при этой температуре все атомы тела приходят в состояние покоя. Разумеется, нельзя ожидать, что газы достигнут этого состояния. При некоторой температуре они сжижаются и перестают подчиняться закону Шарля. Тем не менее рассмотренный выше результат позволяет нам построить теоретическую шкалу температуры, не зависящую от свойств какого-либо определенного вещества. Построение универсальных зависимостей подобного рода — необходимый шаг в развитии любой области физики.

Можно, конечно, было вначале пользоваться произвольной температурной шкалой, основанной, например, на расширении ртути внутри стеклянной трубки, но все же, если возможно, ее надо заменить какой-то иной шкалой, более близкой к абсолютной.

В 1851 г. Уильям Томсон (лорд Кельвин) предложил использовать для реализации такой шкалы термометр, в котором рабочим телом служит воздух при постоянном давлении; по этой шкале можно было бы калибровать другие термометры. Воздух был выбран просто по соображениям удобства; пригоден любой другой «постоянный» газ, но, конечно, не вблизи его точки ожидения. (Томсон на самом деле пошел дальше и показал, как построить еще более приемлемую шкалу на основе теории Карно о «движущей силе теплоты», но так как это чисто теоретический воп-

рос, то мы не будем его здесь рассматривать.) В честь Кельвина температуры, отсчитываемые от абсолютного нуля, обозначаются буквой К; единицы этой абсолютной температурной шкалы такие же, как для шкалы Цельсия.

Описанные события показывают, что развитие физики полно неожиданностей. Измерение свойств газов обнаружило некоторые удивительные закономерности, а более детальное изучение их дало основу для построения шкалы, приемлемой с точки зрения теории. Благодаря этому появилась возможность производить более точные измерения и развивать термометрию. Это позволило измерить коэффициент расширения ртути как функции температуры вместо того, чтобы принимать его постоянным; в результате удалось внести поправки в полученные ранее результаты. Так физика подобно гусенице сама себя подтягивает вперед.

В газовых законах есть нечто еще более важное. Почему вообще они существуют? Ведь не существует столь же универсальных законов жидкостей или законов твердых тел. Простой факт сходства в поведении различных газов означает, что газам присуще нечто принципиально отличающее их от жидкостей и твердых тел. Мы знаем теперь, что это сама природа газообразного состояния. Свойства твердых тел и жидкостей зависят от типа частиц, из которых они состоят: силы взаимодействия между разными атомами и молекулами могут различаться в очень широких пределах. В газах же расстояния между молекулами обычно очень велики по сравнению с размерами самих молекул, и времена, в течение которых молекулы сближаются настолько, чтобы повлиять друг на друга, относительно очень малы. Таким образом, газы обладают свойствами, не зависящими от сил, с которыми молекулы действуют друг на друга. Вот почему все газы ведут себя одинаково. Однако, когда условия меняются, т. е. когда давление и температура достигают высоких значений, вероятность столкновений молекул возрастает и сходство в поведении различных газов исчезает.

Если газы обнаруживают сходство, различаясь лишь массами молекул, то можно надеяться получить дополнительную информацию из измерений их плотности. Как мы видели на стр. 26, первая попытка измерить плотность воздуха была очень грубой, но к XIX столетию научились

производить измерения со значительной точностью. Гей-Люссак разработал также методы измерения плотности паров. Все имеющиеся результаты показывали, что при фиксированных значениях температуры и давления плотность газа пропорциональна его молекулярному весу. В табл. 4 приведены некоторые типичные результаты, полученные с помощью современных методов измерений.

Таблица 4

**Пропорциональность между плотностью и молекулярным
весом газов**

Газ	Плотность ρ , 10^{-3} г/см ³	Молек. вес M	ρ/M , 10^{-5}
Воздух	1,293	28,8	4,49
Ar	1,783	39,9	4,47
CO ₂	1,977	44,0	4,49
He	0,178	4,0	4,45
H	0,090	2,016	4,46
N	1,251	28,0	4,47
O	1,429	32,0	4,47

Они могут означать только одно: все эти газы при одинаковых температуре и давлении содержат в единице объема одинаковое число молекул.

Это один из замечательных общих принципов в физике. Впервые его высказал в 1811 г. Авогадро (1776—1856) с целью объяснить простые правила, касающиеся объемных отношений соединяющихся друг с другом газов, открытые Лавуазье (1743—1794) и Дальтоном. Проницательность Авогадро совершенно удивительна: атомистическая гипотеза Дальтона (стр. 30) была выдвинута лишь незадолго перед тем, а основные представления о молекулах — простых группировках небольшого числа атомов — еще были предметом обсуждений в научном мире.

Гипотезу Авогадро вначале отвергали, и ее значение поняли лишь после того, как Канниццаро (1826—1910) воскресил ее в 1854 г.

Часто ее все еще называют *гипотезой* Авогадро. Гипотеза — это предположение, которое не может быть непосредственно проверено, но кажется верным, потому что

увязывает воедино целый ряд экспериментальных наблюдений¹⁾. Утверждение Авогадро можно рассматривать как гипотезу в том смысле, что мы не можем на самом деле сосчитать число молекул в данном объеме и показать, что это число — одно и то же для всех газов. Но результаты, приведенные в табл. 4, представляют собой такое же убедительное экспериментальное доказательство правильности этой гипотезы, какими мы располагаем при проверке большинства физических представлений. Теперь утверждение Авогадро с полным правом может называться законом Авогадро.

Это просто удивительный закон. Какая же это рука свыше помещает равные числа молекул каких угодно сортов — ибо закон Авогадро применим не только к элементам и их соединениям, но и к смесям — в равные объемы? Так вопрос нельзя задавать. Правильнее другой ход мысли: при данной температуре равные числа молекул в равных объемах создают одинаковое давление. А это уже можно рассматривать как проявление замечательного физического обобщения Больцмана — принципа равнораспределения энергии (стр. 41).

Согласно этому принципу, все молекулы при данной температуре должны в среднем обладать одинаковой кинетической энергией. Следовательно, более тяжелые молекулы должны двигаться медленнее, чем более легкие, и, таким образом, изменение их скорости при соударении с поверхностью сосуда будет меньше. Кроме того, поскольку более тяжелые молекулы пересекают сосуд от стенки до стенки тоже меньшее число раз в единицу времени, они меньшее число раз в секунду ударяют в стенки сосуда. Но давление газа — это мера силы, с которой молекулы действуют на стенки сосуда. Хотя сила эта кажется постоянной, на самом деле она складывается из чрезвычайно большого числа чрезвычайно малых импульсов. Второй закон движения Ньютона утверждает, что сила равна произведению массы на изменение скорости в единицу времени;

¹⁾ Более точно гипотезой называется предположение, предложенное для объяснения какого-либо явления, но еще недостаточно проверенное; правильность ее проверяется посредством научного опыта. Если гипотеза подтверждается, она становится научным законом или теорией. — *Прим. ред.*

другими словами, равна изменению количества движения в единицу времени, которое представляет собой произведение массы на скорость. Таким образом, средняя величина изменения количества движения в единицу времени, обуславливающая давление ¹⁾, пропорциональна как количеству движения, так и скорости, т. е. в итоге пропорциональна кинетической энергии. А кинетическая энергия, согласно Больцману, одинакова для всех молекул.

Таким образом, мы видим, что газовые законы представляют собой проявление кинетической теории, которую мы рассматривали в гл. 3. Кинетическая теория применима ко *всем* состояниям вещества, но только в случае газов по причинам, обсуждавшимся на стр. 53, она приводит к столь замечательно простым законам.

Но мы еще не раскрыли эту простоту до конца. Законы Бойля и Шарля можно объединить в один общий для всех газов закон, выражающийся известным уравнением состояния

$$\frac{pV}{T} = \text{const},$$

где T — абсолютная температура, измеренная по шкале Кельвина; p и V — соответственно давление и объем газа; const — постоянная. Это уравнение в учебниках физики обычно формулируют настолько примитивно, без объяснения его смысла, что оно мало говорит начинающим физикам. Между тем уравнение состояния газа представляет собой замечательный результат, не имеющий аналогий ни в какой другой области физики.

Постоянная в правой части уравнения состояния может быть измерена для различных газов, но при измерении нужно исходить из стандартных условий, скажем брать один грамм газа при давлении, равном одной атмосфере (760 мм рт. ст.), и при температуре 273 К. В этом случае мы получим значение постоянной, характерное для взятого газа. Но постоянные для различных газов находятся

¹⁾ Имеется в виду средняя величина изменения количества движения всех молекул в единицу времени, она пропорциональна как количеству движения одной молекулы, так и числу ударов, приходящемуся на 1 см² стенки за 1 с, которое пропорционально скорости молекул. — *Прим. перев.*

в связи друг с другом, ибо, как мы знаем уже, объем данной массы газа обратно пропорционален его молекулярному весу. Если рассматривать не единичную массу, а массу, пропорциональную молекулярному весу, то постоянная в уравнении состояния газа оказывается одной и той же для всех газов. Поэтому мы примем в качестве стандартной массу газа в граммах, численно равную молекулярному весу, т. е. одну грамм-молекулу. Это означает выбор стандартного объема газа, равного 22,4 л. Легко видеть, что при стандартных давлении, температуре и объеме постоянная будет зависеть только от этих стандартных величин, а не от каких-либо характеристик взятого материала.

Мы можем, таким образом, записать уравнение состояния в виде

$$pV = RT,$$

где R имеет одно и то же значение для *всех* газов. Это уравнение — первое из замечательных обобщений в физике, с помощью которых свойства целого класса веществ выражаются через одни и те же основные величины. Именно к этому и стремится физика — к нахождению общих законов, не зависящих от особенностей тех или иных веществ. Газы, будучи существенно простыми по своей природе, дали первый пример такого обобщения.

Затруднительно определить, кто первый ввел газовую постоянную R . Вероятно, идея настолько очевидна, что никто не стремился заявить о приоритете. Все учебники вводят R мимоходом как необходимое следствие из законов Бойля и Шарля — это так и есть на самом деле. Но обычно, чтобы указать на очевидное, требуется гений. Историки науки тоже, кажется, не зафиксировали обстоятельства появления этой константы: ни в одной из книг, к которым я обращался, выводу газовых законов не уделяется большого внимания.

Газовые законы составляют начало предмета термодинамики, представляющей значительный практический и теоретический интерес. Трудно отделаться от соблазна рассказать кое-что об экспериментах, которые привели к развитию этой дисциплины: об измерениях удельных теплостей газов, выполненных Рейно около 1840 г.,

о наблюдениях, связанных с отклонениями от газовых законов, которые произвел Эндрюс в 1869 г., об измерениях отношений удельных теплоемкостей газов (стр. 61), производившихся Клеманом и Дезормом в 1819 г. Хотелось бы также поговорить о распространении экспериментов в область низких температур, где почти отсутствует движение атомов и наблюдаются новые явления, такие, как сверхпроводимость. Однако этот экскурс увел бы нас слишком далеко от цели нашей книги.

Подведем итог. В этой главе мы показали, как в результате нескольких простых экспериментов выявилась такая картина поведения газов, о которой первые исследователи и не предполагали. Для них различные газы представляли собой «воздухи», которые, очевидно, должны были быть столь же разнообразными по своим свойствам, как жидкости или твердые тела. Законы, найденные ими, составили основу для кинетической теории газов, согласно которой газы состоят из несчетного множества мельчайших молекул, носящихся взад и вперед и беспрестанно ударяющих в стенки сосуда. Закон Авогадро утверждает, что при данных температуре и давлении равные объемы газов содержат одинаковые числа молекул, и из него следует определение важной физической константы — числа Авогадро, числа молекул в грамм-молекуле.

Эта величина, разумеется, слишком велика, чтобы ее можно было непосредственно измерить. Во времена Авогадро ее нельзя было измерить даже косвенным путем: нужно было найти средства для измерения величины атомов. О таких экспериментах мы расскажем в следующих главах.

5. Звук

Мне не очень хотелось писать о звуке в этой книге. В сущности звук связан только с атмосферой, и ни один из аспектов этой темы не является столь фундаментальным, чтобы к нему нельзя было подойти другим путем. Кроме того, основные принципы акустики досконально разработаны и вряд ли могут стать исходным пунктом какого-нибудь совершенно нового пути развития в физике. Но вместе с тем звук является объектом восприятия нашего второго важнейшего органа чувств и служит иллюстрацией некоторых важных общих физических принципов; кроме того, знакомство со звуком облегчает изучение света, ибо некоторые из первых представлений о природе света появились в связи с представлениями о звуке. В конце концов я пришел к выводу, что звук стоит того, чтобы посвятить ему короткую главу.

Основные принципы колебаний струн и воздушных столбов ученым ясны; однако практические задачи, такие, как определение тона колокола или акустических свойств помещения, слишком сложны для теоретического анализа. Вот почему эта тема по-прежнему представляет большой практический интерес.

Прежде всего нам хотелось бы знать, что такое звук. Что именно дает нам возможность слышать проявления того или иного действия на расстоянии? По обыкновению для ответа на вопрос необходимо исследовать как можно больше свойств интересующего нас явления, а затем попытаться объяснить их с помощью некоей связной схемы.

Сперва мы должны установить, какая среда переносит звук от его источника до нашего уха. Для ответа на этот вопрос в XVII столетии применили только что созданный

тогда воздушный насос (стр. 26). Герике поместил колокол в сосуд, из которого можно было откачивать воздух, и приспособил часовой механизм так, чтобы колокол звонил автоматически; он отчетливо наблюдал ослабление звука по мере уменьшения давления воздуха в сосуде.

Может ли звук распространяться и через другие среды? Герике решил эту задачу с помощью великолепного эксперимента, который, пожалуй, вряд ли можно назвать физическим. Он заставлял колокол звучать каждый раз, когда рыбе в озере бросали хлеб. Затем он звонил в колокол, когда хлеб не бросали, и заметил, что рыба при этом все равно появлялась. (Этот эксперимент напоминает позднейшие опыты Павлова, изучавшего условные рефлексы у собак.) Некоторые физики отказывались признать эксперимент убедительным, утверждая, что рыба могла *видеть*, как звонят в колокол. Но позднее результат опыта Герике был подтвержден водолазами, которые слышат звук под водой.

Таким образом, звук переносится материальной средой. Насколько быстро он распространяется? То, что скорость звука может быть измерена, очевидно каждому, кто наблюдал на расстоянии какое-нибудь действие, порождающее звук, — удар спортсмена по мячу или удар дровосека топором: звук слышен заметно позже, чем видно действие, в результате которого появляется звук. Еще одним всем известным примером может служить удар грома вслед за вспышкой молнии. Однако, чтобы произвести количественную оценку скорости распространения звука, нужна сравнительно сложная аппаратура.

Ньютон, безусловно, знал приблизительное значение скорости звука в воздухе, ибо он был в недоумении от того, что она не согласуется с его теоретическим выводом — как обычно, намного опережавшим свое время, — согласно которому скорость звука должна быть равна $\sqrt{p/\rho}$, где p — давление, а ρ — плотность воздуха. Первую реальную попытку точно измерить значение скорости звука предприняли, по-видимому, члены Французской Академии наук в 1738 г. Между прочим, это, вероятно, один из первых в науке примеров запланированных согласованных усилий группы людей, к сожалению, уже тогда направленных на военные цели.

Через регулярные получасовые интервалы стреляли из пушек, расположенных на расстоянии примерно 30 км друг от друга, и наблюдатели с каждой стороны отмечали промежутки времени между появлением вспышки и моментом, когда был слышен звук выстрела. В эксперименте использовались две пары пушек с целью получить средний результат, свободный от ошибок, вызванных движением воздуха. Стрельба через регулярные интервалы, вероятно, давала наблюдателям возможность подготовиться к началу отсчета времени. Правда, получасовые интервалы, очевидно, слишком продолжительны, так как звук проходит выбранное расстояние всего примерно за две минуты. Полученное значение скорости звука, приведенное к 0°C , равнялось 332 м/с.

Расчеты Ньютона давали 279 м/с; это говорило об общей их истинности. Ньютон считал, что звук переносится местными изменениями давления, которые вызывают ощущение звука благодаря колебанию барабанной перепонки. Ньютон был в мучительном положении: теория давала разумный результат, близкий к истинному, но в то же время разница между вычисленным и наблюдаемым значениями значительно превышала экспериментальную ошибку.

Эту трудность разрешил Лаплас (1749—1827); он понял, что изменения давления должны зависеть также от изменений температуры и что, таким образом, закон Бойля — который Ньютон принимал — неприменим к быстрым изменениям давления, характерным для передачи звука. Если же неприменим закон Бойля, то какой закон справедлив? Ответ на этот вопрос лежит, оказывается, в способе измерения удельной теплоемкости воздуха (стр. 34), величины менее определенной, чем удельная теплоемкость твердых тел или жидкостей: мы можем нагревать воздух при постоянном давлении, давая объему увеличиваться, или при постоянном объеме, давая увеличиваться давлению. В первом случае требуется больше энергии, поскольку давление совершает известную работу, расходуемую на увеличение объема. Отношение удельных теплоемкостей, измеренных этими двумя способами, обозначают через γ . Лаплас показал, что правильная формула для скорости распространения звука в газе

имеет вид $V\sqrt{\gamma p/\rho}$. Поскольку γ для воздуха близко к 1,40, расхождение, мучившее Ньютона, почти исчезает.

Перейдем теперь к более детальному рассмотрению звуков, к которым мы привыкли. Ведь мы имеем обыкновенно слушать не только взрывы: мы то и дело слышим речь, а многие из нас охотно испытывают воздействие сочетания разностей давления, известного под названием музыки. Как отличаются эти звуки от звуков выстрелов, о которых мы говорили выше?

Разумеется, задача эта обсуждалась задолго до того, как стали рассматриваться более формальные стороны вопроса. С доисторических времен музыкальные звуки успокаивают или возбуждают человека, и первые ученые пытались разобраться в них еще задолго до того, как понастоящему поняли, что такое музыка.

По существу мы можем сказать, что есть два способа получения музыкальных звуков, если не считать специальных инструментов, таких, как барабан и треугольник: это духовые инструменты, в которых музыкальный тон создается колебаниями столба воздуха, и струнные инструменты, в которых тон создается колебаниями натянутой струны. Мы должны выяснить, почему звук, испускаемый этими системами, приятней для уха, чем простой шум.

Одно из самых первых сообщений о подобном исследовании принадлежит Пифагору (около 580—500 гг. до н. э.). Пифагор использовал (вероятно, им же изобретенный) монохорд — струну, закрепленную на одном конце и перекинутую через острие ножа, так что к ней можно было подвешивать гири, создавая различные натяжения. В те времена было уже много известно об ощущениях, вызываемых различными комбинациями тонов; одни из таких комбинаций были приятными, другие — нестройными, диссонирующими. Пифагор доказал, что особенно гармоничные комбинации тонов создают струны с одинаковым натяжением, длины которых находятся в отношении 2 : 1; два таких тона отличаются, как говорят, на интервал в одну октаву. В случае духовых инструментов отличие тонов на такой же интервал получается также при отношении длин столба 2 : 1. Интервал, известный под названием квинты, получается при отношении 3 : 2. Таким об-

разом, Пифагор показал, что приятные звуки связаны с простыми числами. Нет, однако, никаких сведений о том, что он пытался исследовать вопрос более глубоко, если не считать некоторых сделанных им смелых обобщений.

Теперь мы, разумеется, знаем, что сущность музыкального звука заключается в его периодичности. По-видимому, первым к этому выводу пришел Галилей, вероятно, в результате экспериментов с маятником. Как мы видели на стр. 17, Галилей показал, что колебания маятника могут нарастать под действием даже малой силы, вроде дуновения воздуха, если это действие регулярно повторяется в момент, когда груз маятника проходит наинизшее положение в каком-нибудь одном направлении. Другими словами, груз маятника резонирует на действие периодической силы, частота которой совпадает с частотой собственных колебаний маятника.

Руководствуясь этими представлениями, Галилей прикрепил ряд тонких щетинок различной длины к боковой стенке клавикордов и увидел, что при звучании разных тонов колебались разные щетинки. Галилей, таким образом, заключил — можно сказать, даже счел само собой разумеющимся, — что музыкальные тоны имеют свои собственные частоты колебаний. Он соорудил простую систему: взяв бокал и погрузив его почти по самый край в большой резервуар с водой, заставлял бокал издавать звук прикосновением к его краю; вокруг бокала появлялась радиальная рябь (фото I).

Тон, издаваемый бокалом, был не очень стабильным и иногда менялся, становясь на октаву выше. Галилей с присущей ему исключительной наблюдательностью заметил, что, когда это происходило, рябь в воде становилась вдвое более мелкой. Он не пытался, однако, определить число колебаний в секунду, заметив просто, что оно было явно слишком большим, чтобы его можно было измерить.

Галилей пошел дальше Пифагора и в определении количественной связи между физическими свойствами натянутой струны и частотой тона, который она издает. Но, как обычно, узнать, что именно делал Галилей, нелегко, ибо он описал лишь полученные результаты: при одном и том же натяжении струна вдвое меньшей длины издает

тон на октаву выше, учетверение натяжения струны также дает повышение ее тона на октаву. Частота тона зависит от корня квадратного из «размера» струны, под которым Галилей понимал массу на единицу длины. Галилей утверждал, что золотая проволока издает тон на квинту ниже, чем такая же проволока из латуни, потому что плот-

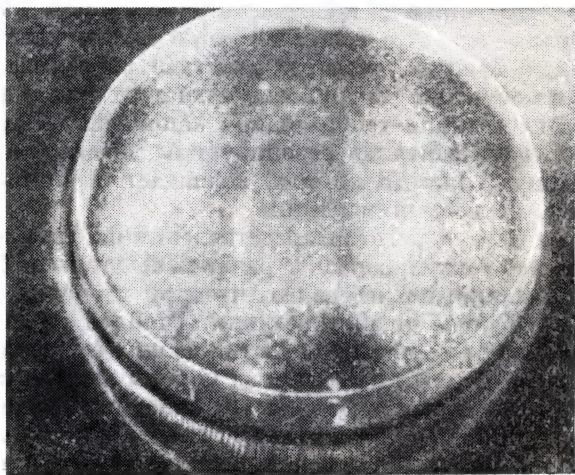


Фото I. Воспроизведение одного из первых экспериментов Галилея по изучению звука: возбуждение воли на воде при помощи звянящего бокала.

ность золота вдвое больше плотности латуни. Он придал своим результатам бóльшую ясность, сравнив поведение обычной струны и такой же струны, обвитой проволокой, — навитые струны еще и сегодня употребляются для получения низких тонов.

Поразительно, что Галилей сумел прийти к этим количественным результатам чисто качественным путем, т. е. без помощи какого-либо метода измерения частот. Он уверенно утверждал, что высота звука определяется частотой колебаний, воздействующих на ухо, и рассматривал возможные причины гармонии и диссонанса. Гармония, говорил он, существует тогда, когда частоты

колебаний просто связаны между собой, и описал следующий эксперимент. Нескольким маятникам, периоды которых находятся в отношении $2 : 3 : 4$, давали качаться вместе; движение нитей маятников образовывало картины, приятные для глаза; если же периоды маятников не были связаны между собой простым образом, то была видна лишь беспорядочная последовательность нитей.

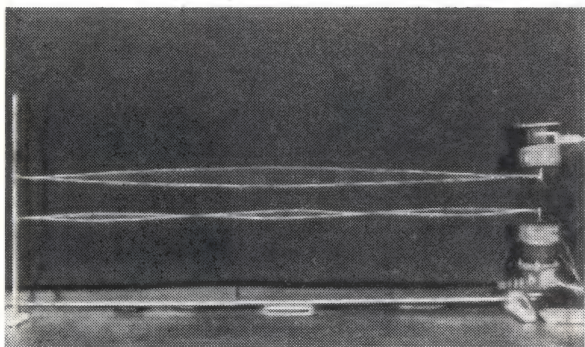


Фото II. Стоячие волны на колеблющейся струне.

Идеи Галилея получили развитие в трудах других ученых. В 1701 г. Совер (1653—1716), рассматривая колебания струны, ввел представление о стационарных состояниях или стоячих волнах, как мы их теперь называем (фото II). Места, в которых нет смещения струны, он назвал «узлами», а колебания с более короткими длинами волн — «гармониками» колебаний с самой большой длиной волны. В 1862 г. Гельмгольц (1821—1894) выдвинул идею, согласно которой сложное колебание можно рассматривать как составленное из основного колебания и его гармоник; в таком случае специфический характер звучания музыкального инструмента можно считать обусловленным различными пропорциями гармоник в общем звуке. По этой причине, например, тон, издаваемый флейтой, звучит по-иному, чем тот же самый тон, взятый на скрипке. Эти представления общепризнаны,

хотя мы теперь знаем, что они не дают полного ответа на интересующие нас вопросы. Чем больше мы узнаем о наших органах чувств, тем более они нам кажутся тонкими и удивительными.

Наиболее важным, что дало учение о звуке для самой физики, несомненно, является понятие стоячих волн. Позже мы увидим, что это понятие может быть распространено на другие колебательные системы и с помощью представлений волновой механики (стр. 209) позволяет проникнуть в строение самого атома.

6. Свет

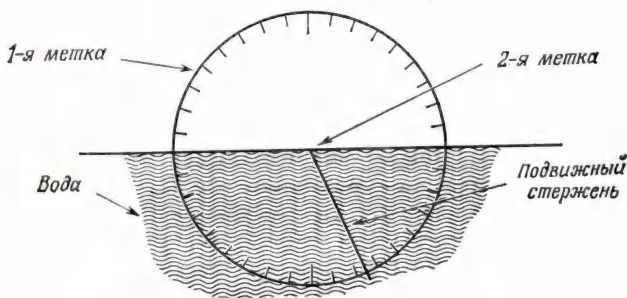
Глаз и по сей день — наиболее важный из наших органов чувств, а свет, с помощью которого мы можем различать предметы, играет такую значительную роль, что совершенно не удивительно стремление ученых на протяжении столетий понять, что же он собой представляет. Может быть, именно оптика была первой частью физики, в которой были проведены измерения. Известно, что Евклид в III веке до н. э. уже знал законы отражения света от плоской поверхности, а Птолемей во II веке исследовал преломление света.

Однако настоящий прогресс оптики начался в XVII веке. Первый вопрос, который требовал ответа, состоял в том, как распространяется свет. Вероятно, первым «экспериментом» было наблюдение, сделанное Торричелли; он заметил, что поскольку можно видеть сквозь пустоту в верхней части его барометра (стр. 28), то свет может распространяться через вакуум и, следовательно, для передачи света не нужно никакой материальной среды. Это было очень загадочно, так как было известно, что звук, казавшийся подобным свету, передается через воздух (стр. 60). Загадка не была решена вплоть до середины XIX века.

Нелегко проследить историю развития оптики с самого начала: очень много ученых исследовали свойства света, и знания о нем приобретались лишь постепенно. Например, закон прямолинейного распространения света в однородной среде общепринят, хотя его исключительно трудно доказать; обычно мы используем это свойство света, наоборот, для физического определения понятия прямолинейности. Тот факт, что свет от точечного источника по-

звояет получить резкие тени, еще ничего не доказывает, потому что так было бы и в том случае, если бы соседние лучи просто проходили одинаковые пути.

Пока давайте поверим в это и посмотрим, как были исследованы другие свойства света. В первой половине II века Птолемей установил законы отражения света, причем почти в том виде, как они сейчас известны нам;



Ф и г. 10. Принципиальная схема метода Птолемея для определения значений углов падения и преломления света на поверхности раздела воздух — вода.

правда, бо́льшая часть его сочинений была утеряна, и поэтому не ясно, как он получил свои результаты. Однако его работа по преломлению света уцелела. Хотя часто говорят, что Птолемей смог установить правильный закон преломления с помощью проведенных измерений, при более внимательном изучении его работы оказывается, что точность измерений была недостаточна для этой цели.

Птолемей получил значения углов падения и преломления луча света при переходе из воздуха в воду следующим образом. Он взял круг с градусными делениями (удивительно, с каких давних пор мы пользуемся делением прямого угла на 90 частей!) и погрузил его в воду точно наполовину (фиг. 10). На круге он поставил два указателя, а затем укрепил прямой стержень таким образом, что он соединял два указателя. Птолемей привел таблицу полученных результатов и, по-видимому, удовлетворился изобретением способа измерения преломле-

ния, не установив никакого соотношения между углами падения и преломления.

Точно такой же метод он использовал для изучения преломления света в стекле, изготовив стеклянный полуцилиндр и использовав его также для измерения преломления от воды к стеклу. Посмотрим на таблицу его результатов (табл. 5). Мог ли Птолемей с помощью этих результатов открыть закон преломления? Получающиеся из этих данных значения показателя преломления ($\sin i / \sin r$) лежат в интервале 1,25—1,34, т. е. не совсем постоянны, но отличаются друг от друга не более, чем следовало ожидать; ни в одном случае, кроме последнего, погрешность в измерении угла существенно не превышает полградуса.

Таблица 5

Результаты Птолемея по измерению преломления
света при переходе из воздуха в воду

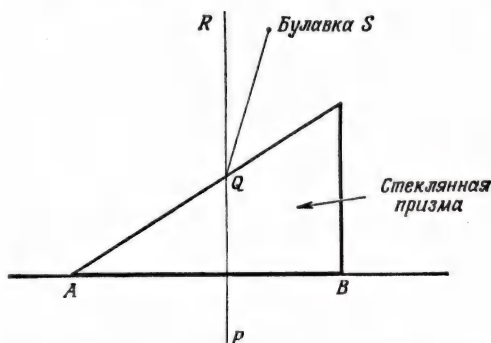
i	10	20	30	40	50	60	70	80
r	8	$15\frac{1}{2}$	$22\frac{1}{2}$	29	35	$40\frac{1}{2}$	$45\frac{1}{2}$	50

Однако при ближайшем рассмотрении обнаруживается нечто подозрительное; видно, что между значениями углов преломления r существует простое соотношение: *разности* между двумя соседними значениями r систематически уменьшаются на $\frac{1}{2}^\circ$ по мере увеличения угла преломления. Это очень неестественно и наводит на мысль, что Птолемей «подгонял» свои результаты к такому виду, который казался ему наиболее разумным. Такое подозрение усиливается после ознакомления с двумя другими его таблицами, обнаруживающими точно то же самое.

Поскольку упомянутые значения разностей углов составляют арифметическую прогрессию, значения углов падения i и преломления r должны быть связаны простым квадратичным соотношением. Читатель может для развлечения найти это соотношение. Таков результат, который должен был бы получить Птолемей из своих измерений и который, конечно же, неверен и лишен физического смысла. Не обнаруживаем ли мы здесь первый пример

научной «подгонки»? Разумеется, нельзя подходить к Птолемею с современными мерками научной объективности; им не руководили еще никакие традиции, весьма вероятно, он не придавал большого значения своим результатам, и ему просто нравилось делать этот опыт. Так что не следует судить его чересчур строго. Но вместе с тем мы не должны излишне поспешно допускать, что, коль скоро результаты были получены, из них можно было вывести и известные законы.

Хотя теперь мы приписываем открытие закона преломления в его современном виде Снеллу (1591—1626),



Фиг. 11. Схема метода Арио для определения значений углов падения и преломления света на поверхности раздела воздух — стекло.

вероятно, его еще ранее открыл Арио (1560—1621). Арио брал стеклянную призму (фиг. 11) и располагал ее так, что поверхность AB была перпендикулярна к линии PQR , проведенной на столе. Таким образом, он знал, что у поверхности AB не должно быть отклонения луча. Он смотрел вдоль прямой PQ , а своего друга попросил перемещать булавку S до тех пор, пока она займет такое положение, что, смотря на нее сквозь призму, он начинал видеть ее в направлении PQ . Зная преломляющий угол призмы, он мог затем вычислить углы падения и преломления. Проведя тот же эксперимент с несколькими при-

змами, имеющими различные углы, он и получил результат, которым мы пользуемся и поныне. Полученное Арио значение ($\sin i / \sin r$) равно $1/0,6528703$.

Этот метод был неудобен тем, что для каждого значения угла падения луча нужна была своя призма при условии, что все они изготовлены из одинакового стекла. Тем не менее, по-видимому, это был первый известный нам успешный эксперимент такого рода — первый из экспериментов с булавкой, которые сыграли большую роль в обучении оптике и которые современные ученые-физики научились презирать.

Кроме того, это была экспериментальная работа. Снелловский вывод, к сожалению, не сохранившийся, почти наверняка был теоретическим. Декарт, вновь сформулировавший закон преломления в 1638 г., присвоил ему имя Снелла. Декарт смотрел на эксперимент свысока, и его вывод закона был, вероятно, тоже теоретическим; возможно, он использовал те же идеи, что и Ньютон позднее, а именно что преломление вызывается притяжением и последующим ускорением движения частиц света, когда они приближаются к преломляющей поверхности. Мы по сей день следуем традиции и приписываем закону преломления имя Снелла.

Едва туман рассеялся в этом месте, как возник в другом. Некоторые кристаллические вещества не удовлетворяли закону преломления, а расщепляли лучи света на *два*, производя два изображения вместо одного. Это явление, названное двойным лучепреломлением, было впервые замечено Бартолином (1625—1698) в 1669 г. и иллюстрируется фото III. Использованный Бартолином кристалл карбоната кальция, называемый исландским шпатом,

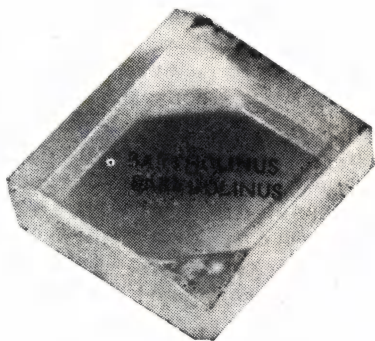


Фото III. Двойное лучепреломление в кристалле исландского шпата.

до сих пор считается наилучшим для демонстрации этого явления.

Могло, конечно, быть так, что по тем или иным причинам у кристалла оказалось два показателя преломления света и что одна часть преломляется с одним показателем, а другая — с другим. Но измерения показали, что одно из преломлений вообще не подчиняется закону Снелла; при равном нулю угле падения угол преломления не равен нулю. Об этом изображении говорят, что оно образуется «необыкновенными» лучами; второе изображение образуется лучами, которые удовлетворяют закону Снелла и называются «обыкновенными».

Так что возникает очень любопытная проблема. Теперь приходится отказываться от уже принятой гипотезы о едином поведении света и не только вводить новый механизм преломления, но и давать какое-нибудь объяснение природе света, которое согласовывалось бы с наблюдаемыми явлениями. Вскоре был сделан первый шаг, а в 1690 г. Гюйгенс (1629—1695) разработал уже полную теорию.

Нужно отдать дань Гюйгенсу особенно потому, что, будучи современником Ньютона, он не всегда находил должное признание. Нужно помнить, что физика переживала еще детский период; всего несколько десятилетий назад наука приступила к закладке своих основ. А это был такой ум, который смог проникнуть в самую глубину сложного явления и создать теорию, которая даже к настоящему времени изменилась не по существу, а только по характеру изложения.

Вторая проблема — почему одна часть света ведет себя иначе, чем другая, — оказалась значительно более твердым орешком. Она привела к знаменитому спору между Ньютоном и Гюйгенсом: первый утверждал, что свет состоит из корпускул, а второй — что он представляет собой волны. Теперь, конечно, легко говорить, что Ньютон ошибался (даже Ньютон не безупречен!), а Гюйгенс был прав. Проследим, насколько это возможно, за доводами, приводившимися ими в свою пользу. Ньютон отдавал предпочтение идее корпускулярности из-за прямолинейного распространения света: частицы движутся по прямой, если на них не действуют никакие силы (стр. 13). Итак, здесь все в порядке. А если бы свет представлял

собой движение продольных волн, подобно звуку, то трудно было бы представить себе, каким образом различные его части вели бы себя по-разному. Действительно, позиция Гюйгенса была слабее всего как раз в том, что касалось двойного лучепреломления, поскольку он предполагал, что свет — это продольные волны. Казалось, что Гюйгенс уходит от этого вопроса и надеется, что другие оптические явления, которые будут объяснены позднее, будут свидетельствовать в пользу его волновой теории.

Зато Ньютон со своими частицами легко мог получить двойное лучепреломление различными способами. Частицы могли бы, например, быть анизотропными, подобно магнитам, и тогда кристалл мог бы сортировать их соответственно их ориентациям и дальше уже преломлять по-разному. Говоря словами самого Ньютона, «каждый луч света имеет, следовательно, две противоположные стороны, наделенные неким свойством, от которого зависит необыкновенное преломление, и две другие стороны, не обладающие этим свойством». По аналогии с магнитом можно сказать, что ньютоновские корpusкулы были поляризованы; это представление сохранилось, хотя идеи Ньютона в течение долгого времени не были в ходу. Странно, но ни Ньютон, ни Гюйгенс не думали, что свет мог бы представлять собой поперечные колебания.

Однако существует еще более простое явление, которое гипотеза Ньютона не может объяснить, — одновременное отражение и преломление света поверхностью стекла. Ньютон выдвинул весьма туманную идею о легком отражении и легком преломлении: он предположил, что луч, состоящий из набора корpusкул, может в определенное время быть в состоянии, когда он легко отражается, а затем — в состоянии, когда он легко преломляется, и т. д. С помощью явлений интерференции, которые мы позднее рассмотрим, Ньютон смог оценить расстояние между этими состояниями, которое оказалось равным $1/89\,000$ дюйма для красного света. Это составляет $2,7 \cdot 10^{-5}$ см — не так уж далеко от половины длины волны красного света, как мы теперь знаем.

Странно, что Ньютон, по-видимому, совершенно игнорировал проявления дифракции. Она была открыта Гримальди (1618—1663), который, вероятно, попытался вы-

полнить «предельный эксперимент». Это очень хорошее поле деятельности для физика; много нового было открыто

именно в попытках узнать, при каких предельных условиях обычные явления перестают иметь место.

В данном случае проблема состоит в резкости тени; хорошо известно, что протяженный источник света, скажем Солнце, дает тени с размытыми краями (фото IV, а) и что чем меньше источник, тем более резки тени (фото IV, б). До какой степени можно довести резкость тени? Гримальди установил, что если использовать в качестве источника света маленькое освещенное булавочное отверстие, то тени снова размываются, более того, появляются «параллельные полосы, а по соседству с ними ряды цветных полос». Гримальди проводил свои наблюдения, используя солнечный свет, проникающий в затемненную комнату через маленькую дырочку; на фото IV, в показана современная фотография этого явления, сделанная с помощью ртутной лампы с очень малень-

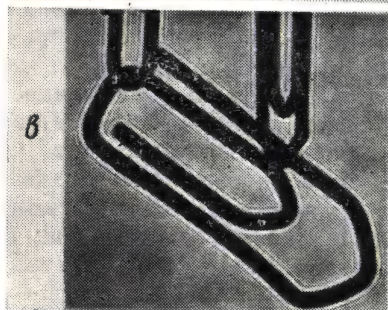
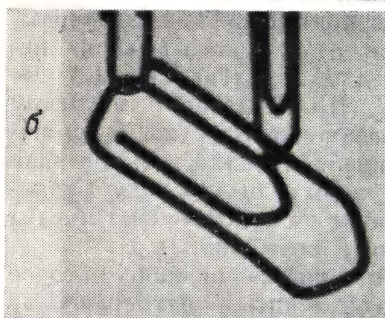
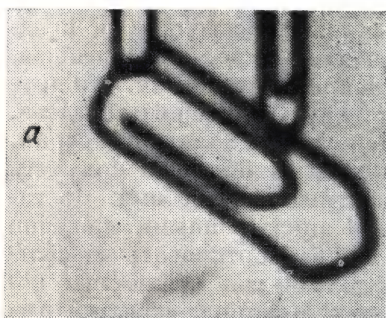


Фото IV. Тень от скрепки, освещаемой: протяженным источником света (а); небольшим источником (б) и очень маленьким источником (в).

кой дугой. Этот эффект был переоткрыт Гуком в 1672 г.

Ньютон заинтересовался этими явлениями и сам повторил опыт. Он получил более обширные результаты, используя различные отверстия разного размера. На фиг. 12 показано, какие эффекты он наблюдал с помощью суживающейся щели; ясно видно уширение тени возле узкого конца щели.



Фиг. 12. Рисунок Ньютона дифракционной картины, наблюдавшейся им на суживающейся щели.

И тут Ньютон подводит нас. Выполнив большое число опытов и измерив, «как лучи света загибаются при прохождении около тел», он замечает вдруг: «но потом мне помешали, и теперь я не могу думать о дальнейшем рассмотрении этих вещей». И он оставляет изучение этого явления незаконченным.

Это в высшей степени странно. Ньютон использовал факт прямолинейного распространения света как аргумент против его волновой природы, так как волны загибаются за препятствиями; а здесь тем не менее он допускает, что и лучи света огибают препятствия. Корпускулярные представления Ньютона задержали прогресс оптики более чем на 100 лет. Мы должны быть осторожны, чтобы не создавать культа даже величайших людей.

К концу XVIII века начали появляться сомнения в справедливости корпускулярной теории, и несколько ученых увидели возможность объяснить наблюдения Гримальди с помощью волновой теории. Крупнейшим из них

был Френель (1788—1827). Он прожил короткую жизнь, осложненную к тому же политическими невзгодами наполеоновского режима. Имя Френеля навсегда вошло в физику в связи с общим классом явлений дифракции, открытых Гримальди. Френель разработал полную теорию этих явлений.

Френель нашел горячего сторонника в лице Араго (1786—1853). Вместе они проделали множество опытов —

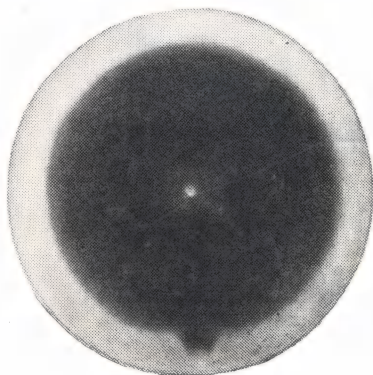


Фото V. Яркое пятно в центре тени от круглого экрана.

одни оказались весьма тривиальными, зато другие приобрели выдающееся значение, поскольку убедили даже противников волновой теории в ее правоте. Эти опыты были поставлены под влиянием Пуассона (1781—1840), одного из наиболее крупных французских ученых начала XIX века.

Пуассон заметил, что если на пути пучка света, испускаемого точечным источником, поместить круглый экран перпендикулярно оси пучка, то волны — если свет есть вол-

новое движение — должны достигать краев экрана в одной фазе; но тогда в центре тени они должны складываться и давать яркое пятно. Этот вывод казался ему совершенно абсурдным. Но Френель и Араго произвели такой опыт и обнаружили, что действительно наблюдается яркое пятно (фото V). Таким образом, был переубежден один из главных противников волновой теории, а сама теория с того времени стала общепринятой.

Мораль этой истории такова: не следует полагаться только на теорию. Сколь очевидными ни казались бы предсказания теории, прежде чем быть принятыми, они всегда должны проверяться экспериментально. Если проверка теории прошла удовлетворительно, теория может быть принята, и можно ставить новые эксперименты;

проверка может привести либо к модификации теории, либо к полному отказу от нее. В истории физики реализуются обе эти возможности.

Можно проверить волновую теорию света иначе, используя другое явление — интерференцию. Определить явления дифракции и интерференции можно как производимые соответственно одним и несколькими пучками света.

Самый знаменитый опыт по интерференции, он же и самый простой, — это опыт Юнга по интерференции света

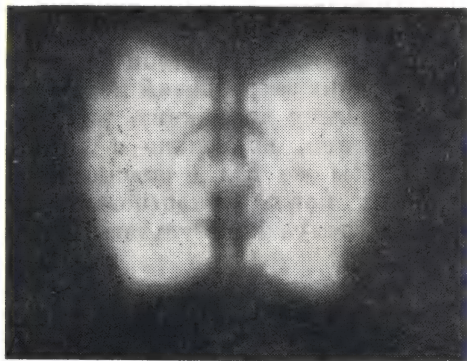


Фото VI. Интерференционные полосы, полученные способом Юнга.

от двух щелей. Юнг (1773—1829) понял, что нельзя ожидать интерференционных эффектов от двух независимых пучков света, и поэтому в 1807 г. он поставил следующий опыт. Он пропустил солнечный свет в темную комнату через отверстие, сделанное острой иглой, получив таким образом расходящийся пучок света. В середину пучка он поместил полоску бумаги шириной около миллиметра, которая разделила пучок на две части. Затем Юнг поместил на пути света экран и обнаружил на нем равноотстоящие полосы — в центре белую, а по краям окрашенные, — наложенные на френелеву дифракционную картину (фото VI). Когда он сдвигал полоску бумаги к краю первичного пучка, полосы исчезали. Юнг проделал и другие опыты, чтобы убедиться в том, что эффект возникает

действительно вследствие расщепления первичного пучка. В настоящее время мы можем сделать этот опыт еще проще: прорежем безопасной бритвой две узкие щели на расстоянии $\frac{1}{2}$ мм одна от другой и, держа их вблизи глаза, посмотрим на удаленный источник света. Мы увидим совершенно отчетливые интерференционные полосы.

Простота и убедительность опыта Юнга сыграли огромную роль в поддержке работ Френеля по волновой теории. Простые эксперименты всегда более убедительны, чем сложные, поскольку чем больше аппаратуры, тем больше возможностей для возникновения ложных эффектов. Простая установка с ясным принципом действия много предпочтительнее.

Другим большим преимуществом опыта Юнга явилось то, что его без всяких затруднений можно сделать количественным. Френелеву дифракцию тоже можно рассчитывать количественно, но только с помощью сложной математики; полосы же Юнга описываются очень простой теорией. Их можно использовать для измерения длин волн света, получая результаты с точностью примерно до 1%.

Великие эксперименты в физике редко бывают «замкнутыми»; они приводят к новым идеям и новым опытам. Опыт Юнга в этом отношении вполне показателен. Он побудил Араго и Френеля провести опыты по интерференции поляризованного света, в которых было окончательно установлено, что свет представляет собой движение поперечных волн. Мысль об этом бродила в умах ряда физиков того времени, только не было экспериментального ее доказательства.

Араго и Френель поняли, что, если бы они смогли показать, что «противоположно»¹⁾ поляризованные пучки света не образуют интерференционных полос, они получили бы ответ на этот вопрос. Поэтому все, что им нужно было сделать, так это поляризовать два пучка, проходящие через две щели в устройстве Юнга, и наблюдать, будут ли образовываться интерференционные полосы. Это легко сказать, но не легко сделать. Араго и Френель отдавали себе полный отчет в важности излучения волн

¹⁾ То есть перпендикулярно. — *Прим. ред.*

одним и тем же источником — в том, что мы теперь называем когерентностью, — и поставили под сомнение свои первые результаты, поскольку их метод поляризации мог привести к некогерентности.

В их работе, опубликованной в 1819 г., описаны во всех деталях все проведенные ими опыты, а также их сомнения относительно полученных результатов. Может быть, достойно сожаления, что сегодня такая работа не была бы принята к опубликованию: редактор вынужден был бы просить авторов укоротить статью, опустив в ней все, кроме заключительного этапа работы — только тех экспериментов, которые прямо доказывают их точку зрения. Конечно, при этом большая часть работы теряется. Тем не менее нам придется придерживаться того же принципа и в этой книге.

Араго и Френель для поляризации пучка применили пластину из вещества с двойным лучепреломлением и использовали обыкновенный и необыкновенный лучи вместо двух пучков света в опыте Юнга. Однако при этом у обоих лучей получаются оптические пути разной длины. Для уравнивания этих путей они поставили на пути одного из лучей стеклянную пластину известной толщины. Однако Араго и Френель все же беспокоила «зависимость выводов от теоретических предпосылок», поэтому в конце концов они проделали следующий эксперимент.

Они поместили однородную пластину из обладающего двойным лучепреломлением селенита (разновидность гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) поверх двух щелей Юнга; таким образом, каждая щель должна была давать два расходящихся пучка лучей, один обыкновенный, другой необыкновенный. Тогда могли бы возникать *три* набора интерференционных полос — один от двух обыкновенных пучков, второй от двух необыкновенных пучков, третий от их смеси. Первые два набора должны были точно накладываться друг на друга и зависеть только от расстояния между щелями; третий набор должен был зависеть от толщины селенитовой пластины. В действительности никакого третьего набора полос, как и ожидалось, не было.

Но отрицательный результат все же был неубедителен. Тогда Араго и Френель разрезали селенитовую пластину на две части и поместили половинки над каждой щелью,

повернув одну из них в собственной плоскости так, что она стала перпендикулярна к другой. Теперь они наблюдали только полосы, возникающие из-за перекрывания обыкновенного и необыкновенного пучков. Но поскольку между пучками имелась разность хода, они образовывали два набора полос, смещенных один относительно другого.

Араго и Френель должны были испытать наслаждение, выполнив эти опыты, которые, будучи простыми, требовали в то же время весьма тонких манипуляций. Они проверили, что получится, если повернуть одну селенитовую пластину на 45° , и увидели все наборы полос сразу. Они доказали, что пучки, поляризованные под прямыми углами, не интерферируют; отсюда можно было сделать только один логический вывод, что свет представляет собой поперечные колебания и что поляризация означает ограничение этих колебаний в какой-нибудь плоскости. Я уверен, что Ньютон был бы в высшей степени удовлетворен столь простым и очевидным объяснением по сравнению с его сложным представлением об анизотропных корпускулах.

Есть и другое очевидное свойство света — его цвет. Какое физическое свойство позволяет свету создавать столь прекрасные ощущения? Ньютон получил основной ответ на этот вопрос в своих опытах с призмами в 1666 г., но не публиковал никаких сведений о них вплоть до 1672 г. Он никогда не торопился с публикациями.

Ньютон был очарован цветами спектра, создаваемого купленной им призмой, и провел несколько простых опытов с ней в своем доме. Другие люди тоже видели такие спектры, но никто не исследовал систематически их природу; большинство людей того времени верили, что призма так или иначе окрашивает белый свет и что цвет — это что-то такое, что можно добавить к белизне.

Ньютон пропустил луч солнечного света через небольшое отверстие в ставнях окна в темную комнату и наблюдал создаваемый призмой спектр на расположенном напротив экране. Его весьма удивило то, что длина спектра была примерно в пять раз больше его ширины. (Ньютон, по-видимому, ожидал, что он будет круглым или что-нибудь вроде того. Я уже раньше, на стр. 35, объяснял важность «ожидания» тех или иных результатов, и эта работа Ньютона является одной из лучших иллюстраций

Ньютон полагал, что различные цвета находятся в связи со способностями к отражению и преломлению, описанными на стр. 69; если бы эти способности он соотнес с длинами волн, он был бы, конечно, прав. Ньютон повторил свои опыты по дифракции (стр. 75) с различными цветами спектра и заметил, что размер полос в случае красного света был больше, чем в случае фиолетового. Это привело к предположению (разумеется, он не мог не делать гипотез! (стр. 23)), что корпускулы вызывают колебания в сетчатке глаза, причем наиболее короткие колебания дают ощущение фиолетового, а наиболее длинные — ощущение красного света. Удивительно, как близко к волновой теории Ньютон смог подойти, так и не достигнув ее!

Таким образом, мы видим, как одно ложное предположение о том, что если бы свет представлял собой волны, то они должны были бы походить на звуковые, привело Ньютона к ряду неверных идей, граничащих, однако, с правильной. Большинство ученых бывали в подобном положении, когда у них никак не вязались концы с концами и они были вынуждены придумывать все более и более экзотические представления для объяснения своих результатов. На этой стадии, может быть, стоит задаться вопросом: «В каких предпосылках мы наиболее уверены?» Почти наверняка одна из них неверна.

Еще одно свойство света было установлено в конце XVII века — скорость его распространения. До тех пор не было уверенности, что свет вообще имеет измеримую скорость. Галилей пытался измерить ее в хорошо задуманном, но безуспешном опыте, в котором участвовали он сам и его слуга, стоящий на значительном расстоянии от него с фонарями. В их результатах, однако, не оказалось согласованности, и Галилей был вынужден заключить, что скорость света слишком велика, чтобы ее можно было измерить таким путем. Человеческие реакции слишком медленны, а интервал времени распространения света, как мы теперь знаем, был слишком мал, чтобы его можно было измерить с помощью грубых приборов во времена Галилея.

Декарт не обладал осторожностью Галилея; он уверенно утверждал, что скорость света бесконечна. Его «доказательство» основывалось на разумной физической

процедуре: Декарт предлагал вообразить, что мы должны были бы наблюдать, если бы скорость света была очень малой, а затем поискать, наблюдается ли что-нибудь подобное в действительности. Однако применил он эту процедуру совершенно неверно. Декарт поставил вопрос о том, что мы должны были бы наблюдать во время затмения Солнца, если бы свет проходил расстояние от Луны до Земли, скажем, за час. Мы не должны были бы, говорит он, видеть тень Луны на Земле, когда она находится на одной прямой с Солнцем, потому что Луна должна была бы пройти дальше за тот час, за который ее тень дойдет до нас. Этот аргумент ошибочен по двум причинам. Во-первых, поскольку мы можем установить местоположение Солнца только благодаря тому, что мы видим его, у нас нет иного средства узнать, где оно находится, кроме света, который оно излучает; поэтому Солнце, край Луны и тень на Земле кажутся находящимися на одной прямой, какой бы ни была скорость света. Во-вторых, хотя Декарт и использовал значительно более длинную базу¹⁾, чем Галилей, он мог утверждать не то, что скорость света бесконечна, а только то, что она больше некоторой величины. Но такой способ рассуждений был чужд Декарту, который ни в коей мере не был экспериментатором.

Первое реальное свидетельство конечности скорости света получил в 1675 г. Рёмер (1644—1710) из наблюдений кажущихся расхождений между моментами затмений спутников Юпитера. Еще Галилей открыл, что у Юпитера четыре спутника (теперь известны еще восемь), движущиеся в той же плоскости, что и планета, вокруг Солнца. Таким образом, поскольку планета отбрасывает гигантскую тень, каждый спутник должен покрываться этой тенью при каждом обороте; и спутники, и сама планета видны, разумеется, только благодаря отражению солнечного света.

Затмения спутников Юпитера должны наблюдаться в различные времена года в соответствии с относительным положением Земли и Юпитера. Было найдено, что интервал между затмениями принимает максимальное и минимальное значения через промежутки времени примерно

¹⁾ Длину пути, проходимого светом.— *Прим. ред.*

в шесть месяцев. Разница между этими двумя значениями была совершенно несомненной — около 30 с, а затмения происходили достаточно часто — каждые $42\frac{3}{4}$ ч, так что можно было отчетливо видеть постепенное изменение интервала.

Поскольку вращение Земли не может нести никакой ответственности за нерегулярности движения спутников удаленной планеты, Рёмеру оставалось предположить, что объяснение лежит в конечной скорости света. За время между двумя затмениями Земля проходит около 5 миллионов километров; 15 с — максимальное отклонение от среднего периода — это, должно быть, время, необходимое свету для прохождения этого расстояния, и, следовательно, скорость света должна быть несколько меньше 320 тысяч километров в секунду. Это было первое определение величины, которая, как мы теперь знаем, является одной из важнейших физических постоянных.

Будучи изложенной таким образом, работа Рёмера кажется весьма прозаической: как будто бы он просто заметил то, что мог бы заметить любой другой человек. В действительности же наблюдения Рёмера — это научный подвиг, ибо в данном случае ряд факторов не благоприятствовал наблюдениям. Во-первых, Юпитер нельзя наблюдать в течение всего года: по крайней мере в течение двух месяцев он находится слишком близко от Солнца. Во-вторых, разумеется, наблюдения затмений невозможно производить в дневное время. В-третьих, поскольку Юпитер столь далек от Земли, его тень направлена почти прямо от нас, и поэтому маловероятно, что можно будет увидеть как начало, так и конец хотя бы какого-нибудь одного затмения. Наконец, спутник Юпитера весьма велик — его диаметр составляет почти половину земного, — а поэтому его затмение не совершенно резкое; ни момент начала, ни момент его окончания нельзя измерить точнее нескольких секунд.

Для того чтобы оценить трудности, с которыми встретился Рёмер в своих расчетах, я взял таблицу моментов затмений спутника Юпитера в течение года (1956), опубликованную в «Морском альманахе». Эти расчетные данные (табл. 6), разумеется, существенно точнее тех, что были в распоряжении Рёмера, и включают все затме-

Таблица 6

Затмения спутника № 1 Юпитера в 1956 г. (для краткости приведено только каждое 10-е затмение)
 Пользуясь этой таблицей, читатель может попробовать сам получить значение скорости света

№	Месяц	День	Начало		Конец	
			ч	мин	ч	мин
0	Январь	9	7	48,0	...	
10		27	0	32,3	...	
20	Февраль	13	17	17,5	...	
30	Март	2	...		12	22,0
40		20	...		5	09,1
50	Апрель	6	...		21	56,8
60		24	...		14	45,0
70	Май	12	...		7	33,3
80		29	...		0	21,5
90	Июнь	16	...		17	09,4
100	Июль	4	...		9	56,8
110		22	...		2	43,6

Ненаблюдаем в августе и сентябре

160	Октябрь	18	12	11,4	...	
170	Ноябрь	5	4	54,3	...	
180		22	21	36,8	...	
190	Декабрь	10	14	18,9	...	
200		28	7	01,1	...	

ния, а не только те, которые происходят ночью. Значения моментов затмений приведены с точностью до $1/10$ мин. Мы видим постепенное изменение последовательных интервалов, и график разности между наблюдаемыми значениями и рассчитанным средним значением интервала дает тот самый результат, исходя из которого Рёмер получил свое значение скорости света. Если бы Рёмер располагал более точными данными такого рода, его открытие, может быть, встретило бы лучший прием, нежели то неверие и даже насмешки, которыми оно было встречено в то время¹⁾. Ньютон, однако, когда писал свою «Оптику»,

¹⁾ Вряд ли менее чем десятипроцентная ошибка Рёмера могла бы повлиять на то, как было принято его открытие. Реакция была не на точную величину, а на сам факт конечности скорости света. — Прим. ред.

не колеблясь признал, что Рёмер измерил скорость света. Даже если бы рассуждения Декарта (стр. 83) были правильными, ему пришлось бы иметь дело с интервалами времени порядка лишь секунд, а не часов.

Проверить результат Рёмера земными средствами казалось невозможным. Даже при расстояниях в несколько километров нужно было измерять отрезки времени порядка миллионных долей секунды, а никакой аппаратуры такой точности в XVII и XVIII веках не было. Постепенно, по мере того как люди овладевали материалами и технологией, стали практически возможными и земные измерения скорости света. Первыми такие измерения выполнили примерно в 1850 г. Физо (1819—1896) и Фуко (1819—1868). Оба они использовали исключительно быстрое вращение, которое стало возможным благодаря тому, что были созданы прочные сплавы, выдерживающие огромные центробежные разрывные силы.

В приборе Физо было зубчатое колесо, которое прерывало тонкий луч света до и после отражения от удаленного зеркала. В аппарате Фуко использовалось вращающееся зеркало; если зеркало поворачивалось на заметный угол за время, затрачиваемое светом на прохождение пути до удаленного зеркала и назад, то можно было бы зарегистрировать смещение изображения источника. Результаты обоих этих измерений оказались в согласии с выводами Рёмера. Установку Физо можно было применять при длинах хода светового луча в несколько километров, а аппарат Фуко — при расстояниях всего лишь до 20 м, т. е. способ Фуко был более удобным. Фуко смог измерить также скорость света в воде; он обнаружил, что она меньше, чем в воздухе, и это знаменовало собой окончательное поражение корпускулярной теории света ¹⁾.

Таким образом, к 1850 г. основные свойства света стали уже известны: свет — волновое движение с очень малой длиной волны, порядка $5 \cdot 10^{-5}$ см; колебания в волнах поперечные; для распространения света не нужна никакая материальная среда, и распространяется он

¹⁾ Волновая теория предсказывает уменьшение скорости света в вещественной среде по сравнению с вакуумом в отношении, равном показателю преломления света средой. — *Прим. ред.*

со скоростью примерно $3 \cdot 10^{10}$ см/с. Но мы все еще не знаем, что же такое свет. Полный ответ дали измерения в совершенно других областях, с этим связан один из наиболее впечатляющих эпизодов из истории физики. Мы опишем его позднее в гл. 9.

Влияние одной ветви физики на другие — это как раз то, чем всегда интересуются физики, поэтому стоит закончить эту главу описанием одного открытия, которое дало сильный толчок развитию физики и в то же время принесло исключительную практическую пользу. Речь пойдет об открытии линейчатых спектров.

Мы уже видели, как Ньютон исследовал спектр горячего тела — Солнца. Все раскаленные твердые тела дают аналогичные сплошные спектры, однако известно, что некоторые вещества, будучи нагретыми в пламени, окрашивают пламя в какой-либо цвет, т. е. демонстрируют только часть спектра. Когда паяльник (сделанный из меди) нагревается на газовой горелке, ее пламя становится зеленым.

Первое сообщение о наблюдении в 1802 г. дискретного спектра принадлежит Волластону (1766—1828). Глядя на лучи солнечного света, проходящие сквозь жалюзи на окне, он вдруг понял, что, используя щели жалюзи в качестве источника света, можно было бы получить более четкий спектр, чем Ньютон с помощью круглого отверстия. Он заметил черные линии в спектре солнечного света и, таким образом, первым наблюдал то, что мы теперь называем фраунгоферовыми линиями.

Открытие линейчатых спектров излучения было сделано, по-видимому, Гершелем (1792—1871) в 1822 г.; он вносил соли некоторых металлов в пламя и наблюдал с помощью призмы возникающие при этом спектры. Позднее Фраунгофер (1787—1826) заметил, что положение желтой линии, испускаемой поваренной солью, совпадает с положением одной из наблюдаемых им темных линий в солнечном спектре.

Эти открытия привели к рождению новой области физики — спектроскопии. Точность ее измерений все время повышалась, и в конце концов были созданы атласы спектров излучения многих химических элементов. Эти данные оказались неоценимыми для идентификации различных

элементов в материалах неизвестного состава (стр. 137) и легли, таким образом, в основу нового метода химического анализа.

Вместе с тем само явление линейчатых спектров было исключительно загадочным. Почему атомы должны испускать излучение с определенной длиной волны? Очевидно, это излучение должно нести информацию о структуре атомов. Однако должно было пройти почти столетие, прежде чем удалось понять происхождение линейчатых спектров.

7. Оптические инструменты

Это единственная глава в книге, специально посвященная инструментам. Аппаратура играла, разумеется, значительную роль и в других разделах физики, но я не думаю, что нужно специально описывать калориметрический прибор в гл. 3 или магнитную и электрическую аппаратуру в гл. 8. Почему же надо описывать оптические инструменты?

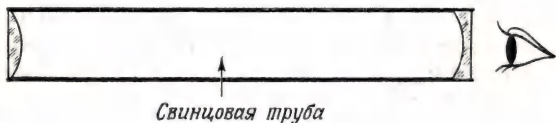
Ответ состоит в том, что оптические приборы позволили не только получить сведения о свете, но и внести вклад в развитие почти всех остальных областей физики. Одна из причин этого заключается в том, что в конечном счете почти все сведения о внешнем мире, поступающие в наш мозг, приобретены благодаря зрению. Вместе с тем применение оптических приборов и методов привело к возникновению таких представлений, которые не родились бы, если бы не оптика. Именно эти соображения оправдывают включение в нашу книгу специальной главы, посвященной оптическим приборам.

Первыми оптическими инструментами были, несомненно, линзы и очки. Благодаря очкам люди с плохим зрением становились полноценными членами общества. Сколько умнейших людей в древние века не были оценены по достоинству только потому, что они имели плохое зрение! К счастью, сегодняшнее общество устроено в этом отношении лучше.

По-настоящему первым оптическим инструментом, т.е. приспособлением, с помощью которого люди смогли добиться того, что ранее им не удавалось, было увеличительное стекло. Оно позволило увидеть такое, что недоступно невооруженному глазу. Удивительно, как много людей, в том числе и ученых, не умеют должным образом поль-

зоваться увеличительным стеклом: они держат его обычно на таком расстоянии от выбранного предмета, что видно лишь большое его изображение. При этом, однако, сильно ограничено поле зрения. Гораздо лучше держать линзу возможно ближе к глазу, постепенно придвигая предмет, пока не станет видно отчетливое увеличенное изображение.

Первые увеличительные «стекла» представляли собой просто капли воды или чистого меда, налитого в маленькую круглую дырочку. Даже после изобретения составного микроскопа в начале XVII века многие ученые пред-



Ф и г. 15. Схема устройства телескопа Галилея.

почитали использовать одиночные линзы, считая, что лучше иметь меньшее увеличение, но зато и меньшие искажения изображения, чем при использовании нескольких линз. Как мы уже писали на стр. 43, один из фундаментальных физических опытов — наблюдение броуновского движения — был сделан с помощью лупы; это случилось спустя более чем 200 лет после изобретения микроскопа.

Телескоп был изобретен примерно в то же время, что и микроскоп (в 1608 г.). У голландского оптического мастера Липпершея работал подмастерье, который, праздно играя линзами, заметил, что, расположив две линзы по одной прямой, можно увидеть увеличенное изображение удаленного предмета. Правда, увеличение было невелико, однако это открытие оказалось весьма волнующим, и весть о нем пронеслась по всей Европе. Она достигла Галилея, и он подобрал, опираясь на свои знания законов оптики, такую комбинацию линз, которая работала должным образом (фиг. 15). Этот прибор и по сей день известен как зрительная труба Галилея. Он имеет малое поле зрения, однако с его помощью Галилей широко раздвинул рамки астрономии. О его открытиях и их приложениях написаны целые тома, поэтому здесь нет необходимости пересказывать их со-

держание, поскольку мы интересуемся только самими экспериментами.

Все же следует сказать, что современники Галилея должным образом не оценили нового оптического прибора. Во всех наблюдениях того времени применялись очень длинные зрительные трубы, и существовала целая наука о том, как ими пользоваться. Наблюдения проводились из специально построенных зданий; например, в Дели (Индия) сохранилась и по сей день в качестве достопримечательности обсерватория XVII века. Нужно напомнить, что кеплеровские законы движения планет были открыты на основе наблюдений Браге, сделанных невооруженным глазом.

Таким образом, существовало некоторое сопротивление внедрению этого новомодного прибора. Астрономы того времени достигали прекрасных результатов с помощью привычных и понятных им инструментов. Зачем нужно было заменять их более сложным прибором, к тому же дающим иногда плохую резкость и имеющим весьма смутный принцип действия? Ко всему еще разве не могли некоторые из подробностей, наблюдаемых с помощью нового инструмента, быть ложными, порождаемыми самим прибором?

Такая реакция на прогресс существует во все времена. И она не обязательно нездоровая. Конечно, оглядываясь назад, сегодня легко увидеть громадные потенциальные возможности телескопа и понять, почему первые несовершенные инструменты не позволяли их современникам предвидеть перспективы. Но сколько мы знаем бесплодных изобретений, не продвинувших технику ни на шаг вперед! Если изобретение действительно стоящее, оно выживет, несмотря на противодействие; может быть, результат будет еще лучше, если изобретатель достаточно уверен в себе и смело выступит против своих оппонентов.

Именно так и было с телескопами. Спустя несколько десятилетий они стали общепризнанными, а уже в 1668 г. Ньютон сделал важное усовершенствование, придумав отражательный телескоп. Он полагал, что нашел единственное решение проблемы искажений цвета, создаваемых линзами обычного телескопа и называемых теперь хроматической аберрацией. Поскольку отражение света не за-



Фото VII. Телескоп Ньютона.

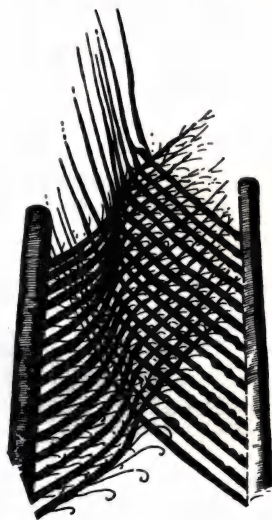
висит от его цвета, то Ньютон решил, что сферическое зеркало должно быть лучшим объективом, чем линза. Теперь мы умеем изготавливать ахроматические комбинации линз, но устройство всех больших телескопов по-прежнему основывается на идее Ньютона. Его собственный телескоп сохранился по сей день (фото VII) и является

самым знаменитым научным инструментом из всех существующих.

История микроскопа не столь ясна, как история телескопа. Возможно, Галилей, изобретая свой телескоп, задумывался также и над задачей увеличения изображений близлежащих предметов, и, поскольку он знал оптику лучше современных ему ученых, весьма вероятно, что он мог вскоре прийти к идее микроскопа. Это как нельзя лучше показывает важность фундаментальных знаний: телескоп мог быть изобретен случайно, но понимание принципов его работы вело к приложению той же идеи в другой области.

Самым знаменитым «микроскопистом» XVII века является Гук (1635—1703). Он был блестящим экспериментатором и сыграл важную роль в поддержке Королевского общества в начале его существования (напомним при этом, что задачей этого общества было развитие экспериментальной науки). Гук построил микроскоп и находил такое удовольствие в работе с ним, что в 1665 г. написал книгу «Микрография» о своих наблюдениях, снабдив ее собственными рисунками; один из них воспроизведен на фиг. 16. Рисунок его микроскопа приведен на фиг. 17. Длина тубуса составляла около 6—7 дюймов (15—18 см), а перемещение объектива можно было осуществлять микрометрическим винтом. Предмет помещался на кончик булавки. Для освещения обычно использовался дневной свет; на рисунке показано, как этот прибор работал при искусственном освещении.

Начиная с XVII века оптические инструменты все время улучшались. Усовершенствованные конструкции, особенно линз, привели к тому, что современные микроскопы



Фиг. 16. Одна из иллюстраций из книги Гука «Микрография».

несравненно лучше первых приборов. В частности, большой вклад в развитие технологии стекла и конструкции линз внесла Германия; в этом немалая заслуга Фраунгофера и Аббе (1840—1905). Можно сказать, что оптическая промышленность обязана теории больше, чем любая другая отрасль. Здесь теория выступала не только как обобщение практики, но и как путеводная нить.



Ф и г. 17. Микроскоп Гука.

В течение многих лет казалось, что микроскопы будут совершенствоваться бесконечно; экстраполяция показывала, что как будто предела разрешения микроскопа (т. е. величины самых мелких деталей, которые еще можно различить) не существует. В конечном счете мы могли бы различать отдельные атомы! Микроскопия становилась полем деятельности, направленной на создание лучших инструментов, их усовершенствование и установление оптимальных условий их работы.

Однако экстраполяция всегда опасна, и парадоксально, но именно Аббе, сыгравший такую большую роль в усо-

вершенствовании микроскопа, показал, что существует предел его применимости. И связан этот предел не с тщательностью изготовления микроскопа, а с волновой природой света (стр. 76): никакой микроскоп, сколь угодно мощный, не сможет разрешить деталей, меньших примерно половины длины волны света. Микроскописты были жестоко оскорблены в своих чувствах; некоторые из них заявили, что их микроскопы позволяют различить детали, меньшие предела Аббе, и поэтому его теория ошибочна. Но они не учли, что теория Аббе не только предсказывает существование предела разрешения, она еще и говорит, что любая видимая в микроскоп деталь, меньшая этого предела, должна быть ложной.

Работа Аббе была, разумеется, теоретической; но она оказала такое влияние на оптику и физику, что необходимо несколько подробнее остановиться на ней. В двух словах, согласно теории Аббе, процесс образования изображения происходит в два этапа: сначала свет рассеивается предметом, образуя дифракционную картину (стр. 74), а затем дифрагированный свет собирается оптическим инструментом и образует интерференционную картину (стр. 77), которая и представляет собой изображение предмета. Эта теория делает особый упор на способе освещения предмета; то, что могло бы показаться сначала просто тривиальным, становится теперь важной частью процесса.

Поскольку собирается не весь рассеянный свет, а только та его часть, которая попадает в объектив микроскопа, восстановление изображения происходит не по всей дифракционной картине, и поэтому изображение не будет точным воспроизведением предмета. Мы можем проиллюстрировать эту мысль, взяв дифракционную картину предмета и образуя изображение с помощью больших или меньших его частей (фото VIII). По мере того как мы берем все большую часть дифракционной картины, изображение становится все более детальным, но можно заметить, что предел деталям кладется размерами полос во внешней части дифракционной картины. Это и есть, разумеется, предел Аббе. Опубликованная в 1905 г. статья Портера посвящена проверке справедливости теории Аббе; автор получал изображения предмета, используя различные

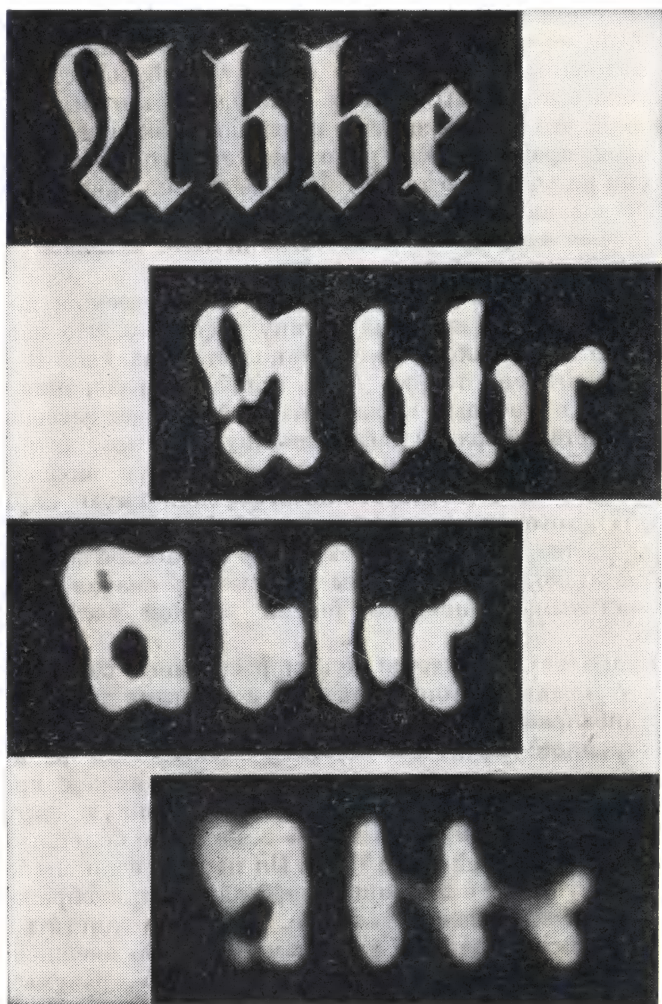
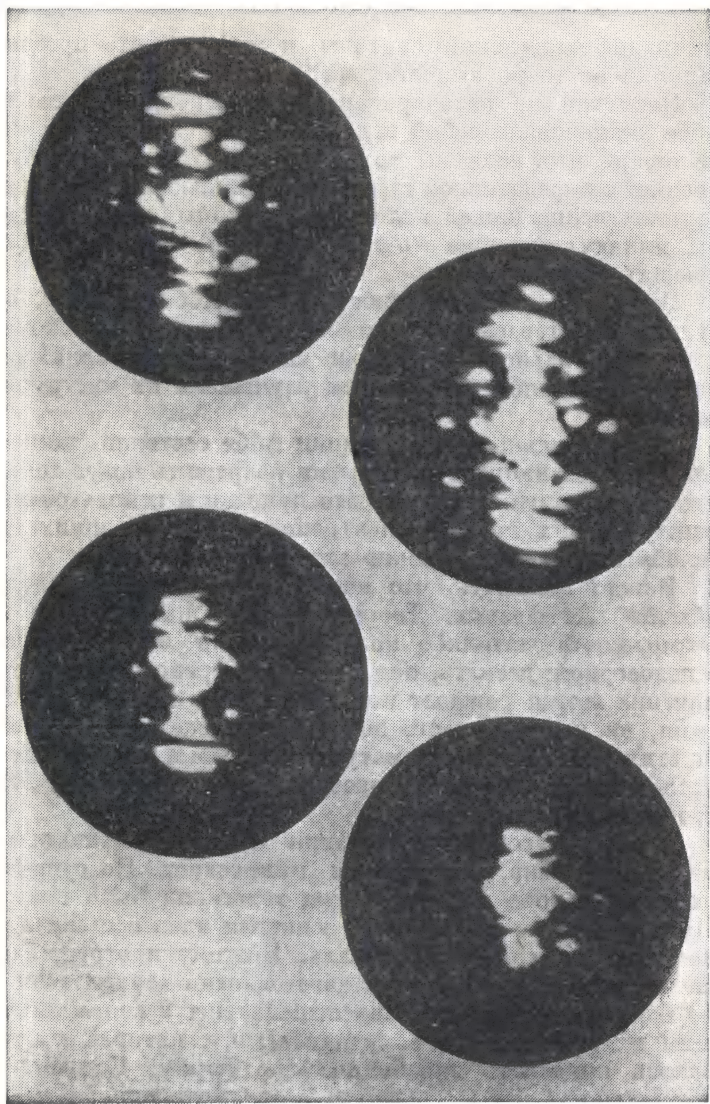


Фото VIII. Иллюстрация к теории
Изображение предмета становится все менее детальным по мере



Аббе образования изображений.
использования все меньшей части рассеянного излучения.

части дифракционной картины, и показал, что предсказания Аббе точно выполнялись.

Несмотря на разочарование микроскопистов, теория Аббе знаменовала собой важный этап в физике. Мы знаем теперь, что, если мы хотим исследовать какой-нибудь предмет с определенной степенью детальности, мы должны соответственно нашей цели подобрать излучение. Примеры, иллюстрирующие это положение, мы опишем в последующих главах.

Что же касается микроскопа, то Аббе показал, что существует предел применимости световых микроскопов, и, следовательно, предостерег мастеров, изготавливающих линзы, от бесплодных попыток улучшения их инструментов.

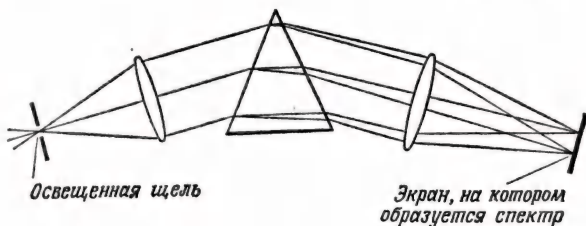
Положительная роль теории Аббе состояла также в том, что она направила попытки разрешить более тонкие детали по другим путям, и это привело к использованию рентгеновских лучей и электронов в исследованиях «деталей» вещества на уровне атомов (гл. 9).

Важно понимать, что подобная роль теории вполне обычна для физики. Теоретическое доказательство невозможности чего-либо может, конечно, быть встречено с недоверием: дескать, оно же не проверено; однако ограничение всегда рождает попытки обойти его другими путями, на которых часто достигается успех. Кроме того, на этих обходных путях могут рождаться и новые способы исследования. Ну и, наконец, всегда есть возможность, что неверна сама теория.

История усовершенствования телескопа значительно менее интересна, чем история микроскопа. По существу последнее слово в конструкции телескопа было сказано Ньютоном. Как мы помним, основная идея состоит в использовании хорошего зеркала. Поэтому прогресс здесь шел только в направлении изготовления зеркал возможно больших размеров, совместимых еще с соответствующим их качеством, т. е. с точностью, с которой им удавалось придавать параболическую форму. Допуски на правильность формы должны быть много меньше длины волны света; обычно допускаются отклонения в $\frac{1}{10}$ и даже $\frac{1}{50}$ длины волны света. Однако даже самый большой современный телескоп — 200-дюймовый (5-метровый)

телескоп в США — по своему принципу не отличается от ньютоновского 6-дюймового ¹⁾.

Распространение телескопов навело Фраунгофера на мысль использовать телескоп для иных целей. Фраунгофер интересовался свойствами стекла, особенно измерением его способности разлагать излучение в спектр. Измерения Ньютона были очень грубыми, поскольку он применял в качестве источника света круглое отверстие (стр. 81). Идея Волластона использовать в качестве источника щель (стр. 87) была большим шагом вперед. Фраунгофер



Ф и г. 18. Схема действия спектрометра.

пошел еще дальше, поняв, что сфокусированное изображение щели позволит достигнуть еще большей точности. Разумеется, для получения такого изображения нужна линза, но тогда свет данного цвета будет расходящимся пучком и пройдет через диспергирующую призму не в одном и том же направлении; поэтому он построил прибор, в котором призма помещается в параллельный пучок света (фиг. 18). Это был первый спектрометр.

Этот инструмент — один из наиболее важных приборов в физике. С его изобретением повысилась точность изучения стекол и, таким образом, стало возможным изготавливать лучшие оптические инструменты; в распоряжении ученых появилось средство для исследования в деталях спектров различных элементов, так что этот прибор способствовал развитию спектрального анализа (стр. 88); с применением спектрометра появился метод анализа света звезд, что дало толчок развитию астрофизики.

¹⁾ В настоящее время заканчивается сооружение еще большего, 6-метрового отражательного телескопа в нашей стране. — *Прим. ред.*

Дальнейшее развитие спектрометров прежде всего связано с изобретением дифракционной решетки. Это изобретение было, по-видимому, сделано случайно, хотя только великий ум способен полностью понять и оценить счастливый случай, выпавший на его долю.

Фраунгофер понял, как он мог бы усовершенствовать исследование дифракции с помощью своего спектрометра. Дифракционная картина предмета в параллельном пучке — мы теперь называем ее фраунгоферовой дифракционной картиной — гораздо легче поддается теоретическому анализу, чем френелева картина (стр. 76), поэтому увереннее можно проверить детальные предсказания теории. Дифракционную картину от щели сегодня легко наблюдать в любом обычном спектрометре, но во времена Фраунгофера при тогдашних относительно слабых источниках света это было довольно трудным делом. Фраунгофер решил увеличить яркость источника, сделав несколько параллельных щелей и поместив их в параллельный пучок света в спектрометре. Для удобства он сделал эти щели на равных расстояниях одну от другой. К своему удивлению, он обнаружил несколько дополнительных дифракционных картин. Таким образом, он первым сделал дифракционную решетку.

Фраунгофер сразу оценил важность открытия и пошел еще дальше. Он сделал решетки, натянув проволоку между двумя параллельными канавками винтовой резьбы, причем такой способ изготовления дифракционной решетки и по сей день остается одним из лучших. Но для точной работы нужны решетки с большим числом щелей (линий) на единицу длины. Это было нужно для большого углового разделения спектров (большой диспергирующей способности); разрешение же определяется только общей длиной решетки. Некоторые ученые, например Роуланд (1848—1901), посвятили почти всю свою жизнь усовершенствованию инструментов для изготовления дифракционных решеток и добились получения решеток сверхвысокой точности. Можно смело сказать, что в измерениях с помощью дифракционных решеток достигнута самая высокая в физике степень точности, причем воспроизводимость результатов достигает 10^{-9} .

Дифракционная решетка почти во всех отношениях

превосходит призму в разложении света в спектр. Во-первых, с помощью решетки с известным расстоянием d между щелями можно определить длину волны λ любой спектральной линии (стр. 88) по формуле

$$n\lambda = d \sin \theta,$$

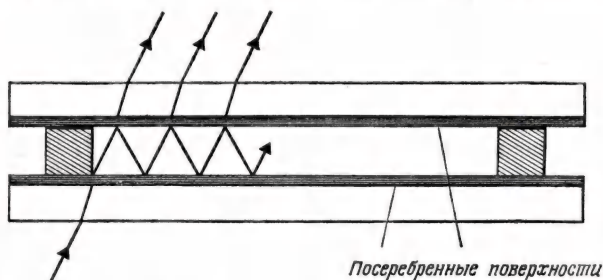
где n — порядок спектра и θ — угол отклонения света при нормальном падении на решетку. Что касается призмы, то для нее существуют только эмпирические соотношения между длиной волны и отклонением, причем для разных стекол соотношения различны. Во-вторых, изменение θ в зависимости от λ в случае решетки значительно сильнее, чем в случае призмы. И, в-третьих, если используется отражательная решетка, скажем металлическое зеркало с нанесенными на него тонкими штрихами, то можно проводить измерения в случае даже таких длин волн, которые были бы полностью поглощены в призме, если только она не сделана из специально подобранного материала. Единственное преимущество призмы состоит в большей интенсивности света, поскольку в этом случае *весь* свет идет на экран; но даже это преимущество теперь отчасти ликвидируется применением решеток со специальной формой прорезей, которые концентрируют большую часть дифрагированного света в каком-то одном порядке спектра.

Вследствие того что, как мы позже увидим, изучение спектров оказало громадное влияние на наше понимание строения материи, я бы сказал, что дифракционную решетку нужно рассматривать как наиболее важное изобретение, когда-либо сделанное физиком. Микроскоп по своему значению близок к ней, но дифракционная решетка позволяет нам заглянуть гораздо «глубже».

Опыт Юнга (стр. 77) имел исключительное значение для проверки волновой теории света, но очевидно, что он был слишком грубым, чтобы давать хорошие количественные результаты. Тем не менее способность его иметь дело с расстояниями порядка 10^{-6} см указывала на новые потенциальные возможности. Если бы можно было добиться большей отчетливости полос, то точность измерений была бы повышена. И кто знает, какие новые явления при этом можно было бы наблюдать? Путь к увеличе-

нию резкости полос состоит в более строгом выполнении условий взаимного усиления световых волн, а это можно осуществить, используя более чем две щели. Именно в этом, разумеется, и состоит принцип действия дифракционной решетки, о которой мы только что говорили.

Однако существует и другой путь увеличения числа интерферирующих волн, а именно использование многократного отражения одной и той же волны. Если вы находитесь в комнате с зеркалами на противоположных



Ф и г. 19. Схема действия интерферометра Фабри — Перо.

стенах, то можете увидеть длинный ряд отражений лампы внутри комнаты. Сделав прибор такого рода, только значительно меньших размеров, можно очень простыми средствами достигнуть весьма большой точности.

Самый важный из приборов такого рода построили Фабри (1867—1945) и Перо (1863—1925). Их прибор состоит просто из двух оптически плоских пластин, посеребренных с внутренней стороны так, что они отражают около 95% падающего на них света; они закреплены строго параллельно друг другу (фиг. 19). Чем выше отражательная способность, тем резче интерференционные полосы, но тем они и слабее. Очевидно, что при отражательной способности, равной единице, они вообще бы не наблюдались.

Пластины, или эталоны Фабри — Перо, как их теперь называют, обычно имеют просвет порядка нескольких миллиметров. С помощью таких пластин, как в случае грубых дифракционных решеток (стр. 100), наблюдается интерференция вплоть до высоких порядков, и вследствие на-

ложения множества спектров не удастся использовать высокую точность прибора. Однако его сочетание с дифракционной решеткой позволяет получить весьма важные результаты. Можно выделить с помощью дифракционной решетки линию в спектре и анализировать ее дальше с помощью эталона Фабри — Перо. Таким путем можно обнаружить тонкую структуру линии. Например, *D*-линия натрия, обнаруженная Фраунгофером (стр. 88), выглядит одиночной в большинстве спектрометров с дифракционными решетками. Однако набор интерференционных полос, образуемых пластинами Фабри — Перо, оказывается более сложным, чем следовало бы ожидать в случае одиночной линии, и наблюдаемую картину можно объяснить, только предположив наличие двух линий. Другие исключительно важные применения такой мощной комбинации приборов будут описаны в гл. 10.

Спектрометрия высокой разрешающей способности в большой степени основана на описанной многолучевой интерферометрии; одним из приборов для получения такой интерференции является эталон Фабри — Перо. Вместе с тем все еще сохраняет свое значение двухлучевая интерференция; с ее помощью можно исследовать, насколько плоской является поверхность, со значительно лучшей точностью, чем любыми механическими средствами. Наблюдая интерференционные полосы, образуемые двумя поверхностями, одна из которых с достаточной точностью плоская, а другая проверяемая, легко обнаружить отклонения от плоскостности порядка 10^{-5} см. Поверхности с такой плоскостностью называются «оптически плоскими».

Эта легкость точных измерений — по существу измерений малых разностей оптических путей (стр. 76) — была сразу оценена физиками по достоинству, и в течение XIX века на этой основе было изобретено множество весьма совершенных приборов. С их помощью можно, например, измерить показатель преломления воздуха или оценить неправильность пригонки компонент оптических систем. Эти приборы были названы интерферометрами, и с помощью одного из них, интерферометра Майкельсона, было сделано столь важное открытие, что имеет смысл привести здесь подробное описание этого открытия.

Майкельсон (1852—1931) вполне может считаться гением по части оптических опытов; еще студентом он умел выполнять эксперименты, которые истощали все ресурсы — как умственные, так и финансовые — его наставников. Он изобрел звездный интерферометр для измерения угловых размеров звезд. Но самым знаменитым экспериментом, выполненным им совместно со своим сотрудником Морли (1838—1925), была попытка измерить разность скоростей света в двух взаимно перпендикулярных направлениях и тем самым определить скорость движения Земли в пространстве.

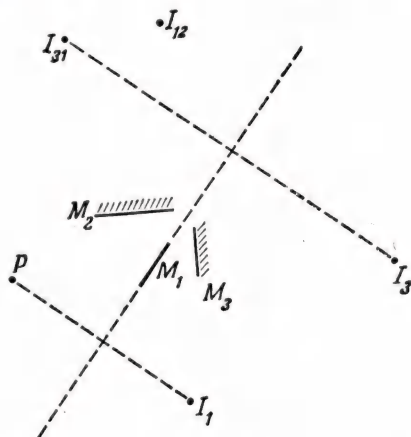
На первый взгляд эта попытка выглядела безнадежной. В интерферометре Майкельсона свет дважды проходит один и тот же путь: один раз — туда, другой — обратно, поэтому определяется только средняя его скорость. Далее, из всех учебников оптики известно, что средняя скорость тела, движущегося сначала вдоль, а затем против течения, почти та же, что и при движении поперек течения туда и обратно; обе скорости различаются только на величину второго порядка малости ¹⁾, v^2/c^2 , где v — скорость потока, а c — скорость тела. В опыте Майкельсона — Морли «тело» — это поток световых волн, а «поток» — это эфир, движущийся мимо Земли. Скорость движения эфира едва ли могла быть больше 10^{-3} (т. е. $1/1000$) скорости света, поскольку орбитальная скорость Земли составляет примерно 10^{-4} скорости света, и, таким образом, Майкельсон и Морли пытались измерить относительную разность скоростей порядка 10^{-6} .

Рассмотрим их прибор — интерферометр Майкельсона. В нем используется посеребренное полупрозрачное зеркало, которое отражает столько же света, сколько и пропускает; таким образом (фиг. 20), можно направить части одного и того же пучка света в двух взаимно перпендикулярных направлениях, заставить их отразиться назад от двух зеркал, свести и затем заставить проинтерферировать. При этом можно сравнить пути, пройденные светом, причем если один из них изменится на половину длины волны света, то интерференционная картина сдви-

¹⁾ Величиной второго порядка малости называется квадрат малой величины; этот квадрат много меньше самой величины. Например, квадрат 0,01 равен 0,0001.

нется на одну полосу. Таким методом Майкельсон и Бенуа в 1894 г. промерили ряд волн, проходящих точно заданное расстояние, и определили значения их длин в долях метра. (Теперь сам этот метод используется для определения «эталона» метра ¹⁾.)

Образование интерференционных полос в интерферометре Майкельсона часто объясняют недостаточно ясно.



Ф и г. 20. Схема действия интерферометра Майкельсона.

M_1 — полупрозрачная пластинка; M_2 и M_3 — зеркала. В точке P находится протяженный источник; I_1 — его изображение в M_1 , а I_{12} — изображение I_1 в M_2 ; I_3 — изображение P в M_3 , а I_{31} — изображение I_3 в M_1 . I_{31} и I_{12} действуют в качестве когерентных источников света и поэтому приводят к образованию интерференционных полос Юнга. Слегка меняя положение M_3 , можно добиться различных относительных положений I_{31} и I_{12} в пространстве, получая таким образом полосы различной формы.

Если источник света точечный, то в зрачок глаза попадает только свет, идущий в определенном направлении, и в соответствии с полной разностью оптических путей, независимо от того, находятся волны в фазе или нет, будет видна только различная интенсивность света, но не полосы. Если же, однако, применяется *протяженный* источник, то в глаз будет попадать свет, идущий по разным направлениям, причем некоторые из этих направле-

¹⁾ Метр сегодня определяется как длина, равная 165 076 373 длинам волн определенной линии изотопа криптон-86. — *Прим. ред.*

ний будут соответствовать максимумам, а другие — минимумам интенсивности света; другими словами, на изображение источника наложится совокупность интерференционных полос.

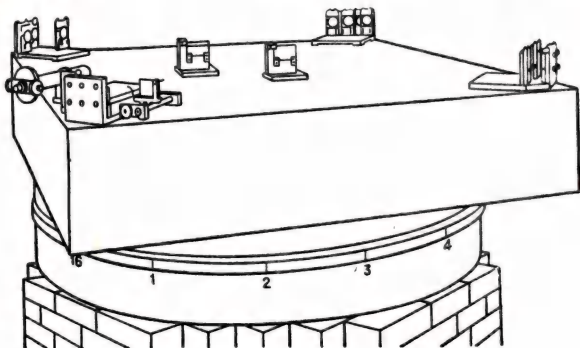
Если бы скорость света менялась с его направлением, то эти полосы должны были смещаться по сравнению с тем положением, которое соответствует постоянству скорости. Однако такой сдвиг нельзя было зарегистрировать из-за отсутствия эталона, с которым можно было бы сравнить получающуюся картину. Поэтому задача, стоявшая перед Майкельсоном и Морли, заключалась в том, чтобы построить *поворотный* интерферометр и посмотреть, как сдвигаются полосы при различных ориентациях прибора. Но обладал ли их прибор достаточной чувствительностью? И можно ли было сделать его достаточно механически жестким, если он должен был быть к тому же поворотным? Эту проблему можно сравнить с той, что стояла перед Кавендишем (стр. 19).

Проблема, стоявшая перед Майкельсоном и Морли, заключалась, таким образом, в следующем. Чувствительность их прибора зависела, очевидно, от его размеров. Но увеличение размеров усложняет задачу равномерного вращения прибора. Майкельсон уже строил интерферометры, в которых оптический путь составлял около 1 м; но для этого эксперимента, как он считал, нужны пути около 10 м. Представлялось невозможным поддерживать сплошной круг диаметром 10 м настолько устойчиво, чтобы можно было проводить интерферометрические опыты, поэтому Майкельсон и Морли применили систему зеркал, позволившую увеличить оптический путь, не увеличивая размеров самого прибора. Интерферометр они установили на каменной плите площадью около 1,5 м² и толщиной около 0,3 м (фиг. 21), которая в свою очередь покоилась на деревянной подставке, плавающей в ртути.

Каждый, кто проводил интерферометрические измерения, оценит по достоинству искусство наладки и работы с таким прибором. Наблюдения проводились при непрерывно вращающемся приборе, поскольку оказалось, что при его остановке картина деформируется, затрудняя расшифровку. Наблюдения за положением полос производились через каждые $\frac{1}{16}$ оборота в течение шести обо-

ротов, причем скорость вращения (один оборот за шесть минут) была достаточно низкой, чтобы можно было отмечать положение выбранной полосы при прохождении каждой из 16 меток.

Результат всей этой работы оказался нулевым! Небольшие отклонения наблюдались, но они были значительно меньше, чем ожидалось, если принимать во внимание только одну скорость движения Земли по орбите.



Ф и г. 21. Интерферометрическая установка Майкельсона и Морли для определения скорости движения Земли в пространстве.

Разумеется, могло быть так, что как раз во время опыта скорость Земли оказалась близкой к нулю. Тогда они повторили опыт спустя три месяца, так как через шесть месяцев Земля должна была бы двигаться по своей орбите вокруг Солнца в обратном направлении. И опять никакого заметного движения Земли не было зарегистрировано.

Казалось, все обернулось для экспериментаторов неудачей. Не может быть, чтобы вся Вселенная, включая Солнечную систему, вращалась вокруг этой маленькой планеты, Земли¹⁾. Для объяснения отрицательного результата выдвигались самые различные соображения

¹⁾ Иными словами, Земля неподвижна относительно эфира. Опыт Майкельсона — Морли и привел к отказу от представления об эфире, державшегося в физике два века.— *Прим. ред.*

крупнейшими физиками того времени; к чести Майкельсона надо сказать, что никто не усомнился в его результатах. Майкельсон и Морли сначала пришли в замешательство, но основательность, с которой были получены их результаты, несколько успокаивала их. К счастью, оба они дожили до появления объяснившей этот результат теории относительности, созданной Эйнштейном (1879—1955) в 1905 г. и вскоре полностью признанной физиками. Этот эпизод показывает, что истинное значение действительно важной работы редко по достоинству оценивается теми, кто ее выполняет; только история может выявить истину. То, что мы воспринимаем как неудачу, может оказаться блистательным успехом.

8. Магнетизм и электричество

До сих пор мы говорили о явлениях, доступных непосредственному восприятию нашими органами чувств, — о движении, теплоте, звуке и свете. Изучение этих явлений, как мы видели, сопряжено со многими трудностями, но в существовании их никто не мог усомниться. Теперь мы переходим к явлениям далеко не очевидным. Словно у Природы есть какие-то глубоко запрятанные ключи наряду с теми, что открыты нашему взору. Попытки добраться до них приводят к появлению новых областей физики, возникновение которых никак нельзя было предвидеть. Хорошим примером таких явлений могут служить магнетизм и электричество. Оба они были открыты случайно. На первый взгляд они вовсе несхожи, но пути их исследования постепенно переплелись, и теперь их невозможно рассматривать отдельно ни в одной связной теоретической схеме. Магнетизм и электричество следует рассматривать как разные проявления одного и того же фактора, но что это за фактор, невозможно объяснить только на основе того, о чем говорилось в предшествующих главах. Поэтому нам придется опять вернуться к истории.

Магнетизм известен по крайней мере с V века до нашей эры. Некоторые камни, найденные вблизи города Магнезия (теперь Манисса) в Турции, обладали тем свойством, что, будучи свободно подвешены, всегда ориентировались в определенном направлении. Кто открыл это свойство и при каких обстоятельствах, никому не известно. Может быть, этот человек воздвигал статую какого-нибудь идола или делал орнамент? Кем бы он ни был, такое наблюдение мог сделать только человек, обладавший замечательным умом. Как я уже говорил, чтобы отделить важное наблю-

дение от малозначительного, нужен великий ум, и открытие магнитной руды — «указателя дороги» — должно занимать видное место среди крупных открытий в физике, ибо оно стало исходным пунктом новых непредвиденных путей развития этой науки.

Нет ничего удивительного в том, что столь непонятное явление не сразу привело к явным успехам в этой области физики. Применение магнитной руды мореплавателями в качестве указателя направления имело огромное значение, но сами мореплаватели, несомненно, приписывали ее свойства какой-то сверхъестественной силе. Изучение этого явления, сдерживаемое общим негативным отношением ученых того времени к эксперименту (стр. 9), продвигалось медленно. В 1269 г. Перегрин опубликовал манускрипт о своем открытии. Он обнаружил, что у магнита есть два места, где «магнитное действие» особенно велико — мы теперь называем эти места полюсами, — и что одно из них указывает на север, а другое — на юг. Перегрин установил, что одноименные полюса магнитов отталкиваются, а разноименные притягиваются и что если кусок магнитной руды разломить пополам, то каждый из обломков также имеет два полюса. Короче, он открыл основные факты, относящиеся к магнетизму.

Однако человеком, имя которого обычно связывают с представлением о магнетизме, стал Гильберт (1540—1603). Огромная заслуга его заключается в том, что он предельно объективно классифицировал множество известных магнитных явлений, о многих из которых он, должно быть, узнал из работы Перегрина. В 1600 г. Гильберт опубликовал свою собственную работу «О Магните», в которой зафиксировал свои наблюдения. Самый известный его эксперимент был поставлен с целью объяснить магнетизм Земли. Гильберт изготовил шар из магнитной руды и исследовал, каким образом шар действует на маленькую железную стрелку. Он обнаружил сходство поведения этой стрелки (фиг. 22) с поведением стрелки инклинометра (компасной стрелки, вращающейся на *горизонтальной* оси) вблизи Земли и пришел к заключению, что Земля представляет собой гигантский магнит — факт, который теперь принят нами, но все еще не вполне объяснен.

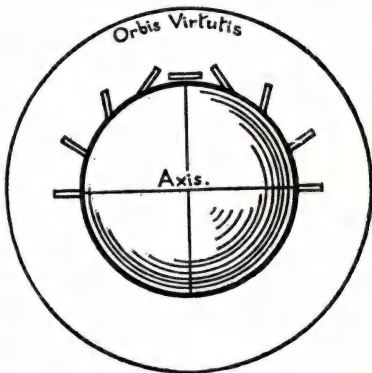
Гильберт высказал мысль, что «магнетическое действие выливается с каждой стороны» магнитного тела — утверждение, которое предвосхищает наше современное представление о магнитном поле. Представление о поле является настолько общим в физике, что работа Гильберта заслуживает большого признания уже за одно это понятие.

Изучение электрических явлений шло еще более медленными темпами, чем изучение магнетизма, возможно, потому, что они не находили практического применения. В то время, когда была открыта магнитная руда, несомненно, уже были известны электрические свойства янтаря. О том, как было сделано это открытие, высказывать предположения гораздо проще: например, какой-нибудь пастух мог заметить, как клочки шерсти

иногда пристаю к янтарным бусам. Но электрические свойства столь преходящи, что изучать их значительно труднее.

Опять-таки именно Гильберт вдохнул жизнь в изучение этого предмета. Он пытался установить, какие вещества похожи на янтарь по своим электрическим свойствам, а какие — нет. В числе последних оказались главным образом металлы, но Гильберт, конечно, не мог в то время оценить важное значение своих наблюдений.

В 1660 г. Герике изготовил электрическую машину (фиг. 23), которая представляла собой шар из серы, насаженный на железную ось. Шар можно было вращать; если при этом к нему прикладывалась ладонь, он заряжался и мог создавать маленькие искры — первые искры, которые наблюдались в эксперименте. Герике заметил, что шар притягивает легкие тела; коснувшись шара, они тут же от него отталкиваются и не притягиваются снова, пока не коснутся какого-нибудь другого тела.



Ф и г. 22. Маленькая Земля («Терелла») Гильберта.

Горизонтальная прямая — геометрическая ось; внешняя окружность — область действия земного магнитного поля.

Нам теперь понятны все эти факты, но в то время они казались загадочными. Магнетизм и электричество обнаруживают сходные свойства. Представляют ли они собой проявление одного и того же феномена? Они, в самом деле, кажутся очень схожими, причем магнетизм связан с железом, а электричество — с янтарем и некоторыми другими материалами — гильбертовскими «электриками». Но электрические эффекты значительно менее стойки, чем



Ф и г. 23. Электрическая машина Герике.

магнитные: магнетизм нельзя уничтожить простым прикосновением другого тела. Гильберт заметил еще одно довольно странное различие: сила электрического притяжения действует по прямой линии, магнитное же притяжение обычно направлено под углом (фиг. 22). Сегодня мы знаем, что последнее свойство проистекает от того, что магнитные полюса встречаются только парами, тогда как электрические заряды могут быть одиночными. Нужен был гений, чтобы свести все эти представления воедино.

В 1733 г. Дюфе (1698—1739) высказал мысль, что электрические явления можно объяснить, предположив существование двух родов электричества — стеклянного (положительного) и смоляного (отрицательного). Дюфе привел список веществ, включающий стекло, которые позволяли получить электричество первого рода, и дру-

гой список веществ — среди них янтарь, — которые давали электричество второго рода. Каждое из них отталкивает электричество своего вида и притягивает противоположное. Так был заложен фундамент учения об электричестве.

Следующий шаг примечателен в другом отношении: на сцену выходят ученые Америки. Первые переселенцы в Северной Америке основали новое государство в 1620 г., и вначале им приходилось расходовать все свои силы только на то, чтобы выжить. Когда же рискованное предприятие увенчалось успехом, их потомки смогли позволить себе ослабить напряжение и уделить внимание вещам, менее связанным с непосредственными жизненными нуждами. Они смогли посвящать свое свободное время искусствам и наукам, среди них стали появляться одаренные люди, которые занимались деятельностью, не сулившей прямого практического применения.

Таким человеком был Франклин (1706—1790), который посвятил изучению электричества всю свою жизнь. Он проделал блестящий эксперимент, пропустив разряд молнии по влажной бечевке от воздушного змея и продемонстрировав тем самым электрическую природу молнии. Этот отчаянный эксперимент мог стоить ученому жизни. Вряд ли кто-нибудь сегодня добровольно согласился бы быть проводником молнии! Однако Франклин как будто не пострадал и смог в дальнейшем провести хоть и менее впечатляющие, но более важные опыты.

Замечательным вкладом Франклина в развитие науки об электричестве явилось его усовершенствование теории двух родов электричества Дюфе. Примерно в 1748 г. он высказал мысль, что оба вида электричества представляют собой просто избыток и недостаток электричества одного-единственного вида: «Части предмета, подвергаемого трению, притягивают в момент трения электрический огонь и, следовательно, отнимают его от трущего предмета; те же части склонны отдать полученный ими огонь любому телу, у которого его меньше». В этом заключается основа современной теории, которая сейчас носит название электростатики.

Большую роль в создании этой теории сыграл прибор (Франклин пользовался им), который называют лейден-

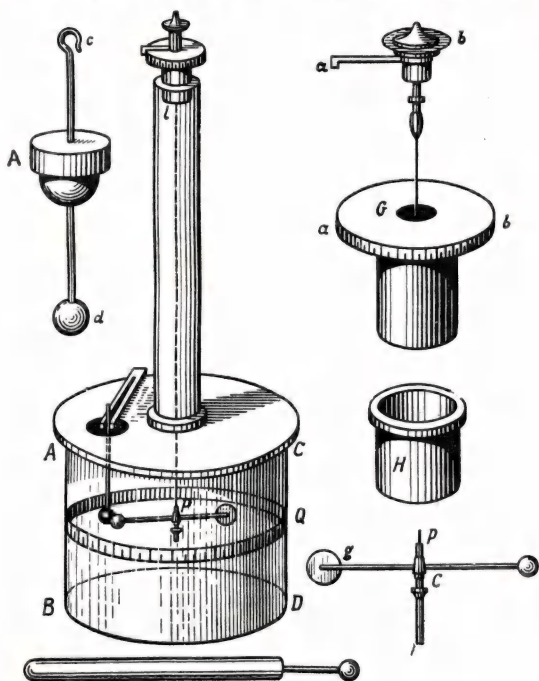
ской банкой. Он был открыт — именно открыт, а не изобретен — Клейстом в 1745 г. Клейст ввел гвоздь в медицинскую склянку, в которой было немного ртути, и обнаружил, что она может вместить большое количество электричества. «Если я прикасался пальцем к гвоздю, когда он электризовался, — писал ученый, — то я получал удар, который приводил в содрогание всю руку и плечо». Смелый человек!

Мы считаем электрический удар чем-то само собой разумеющимся, но уже важно то, что тело человека реагирует на протекание электричества таким образом. Процессы, происходящие в живом организме, управляются посредством электрических сигналов, и электрический удар представляет собой по существу большую перегрузку некой электрической схемы; замечательно, что тело человека может выдержать перегрузку порядка 10 g без остаточных повреждений, правда в течение лишь очень короткого времени. Позже мы увидим, как эта связь между электричеством и процессами в живых организмах позволила сделать еще более замечательное открытие в другой области физики — в учении об электрических токах.

Продолжим наше рассмотрение статического электричества. Как зависит сила притяжения или отталкивания между зарядами от 1) величины зарядов и 2) расстояния между ними? На второй вопрос ответил Кулон (1736—1806), имя которого присвоено единице количества электричества. Это не совсем оправданно по двум причинам: во-первых, кулон — значительно больший заряд, чем тот, с которым имел дело Кулон или кто-либо другой, ибо два заряда по 1 Кл каждый, находящиеся на расстоянии 1 м, действуют друг на друга с силой в несколько миллионов тонн, а во-вторых, Кулон, по-видимому, интересовался не столько электричеством, сколько приборами. Он придумал чрезвычайно чувствительный прибор для измерения силы — крутильные весы (фиг. 24) — и искал возможности его применения.

Прибором Кулона пользовался не он один: примерно в то же время его использовал Кавендиш для измерения G . Но задача Кавендиша, как мы видели (стр. 21), в основном ограничивалась рамками его эксперимента, тогда как Кулон, изготовлявший значительно меньшие приборы,

ставил своей целью сделать их как можно более чувствительными. В одном из приборов Кулон для подвеса использовал шелковую нить длиной 10 см, которая поворачивалась на 1° при силе $3 \cdot 10^{-9}$ гс. С помощью таких прибо-



Ф и г. 24. Крутильные весы Кулона.

ров Кулон установил, что сила взаимодействия между двумя электрическими зарядами и между двумя полюсами магнитов обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами или полюсами.

Учебники обычно мало говорят о второй части закона Кулона: о том, что сила взаимодействия между двумя зарядами прямо пропорциональна величине каждого заряда. Это утверждение считают в той или иной степени само собой разумеющимся. Экспериментальное доказательство его, однако,— непростое дело, поскольку сама

величина заряда определяется через закон Кулона. Эту задачу можно решить, исходя из предположения, что если заряженный проводящий шар привести в соприкосновение с точно таким же незаряженным шаром, то заряд распределится поровну между обоими шарами. Если провести эксперимент Кулона с заряженным шаром, который отталкивает шар, несущий некоторый фиксированный заряд, а затем повторить эксперимент с шаром, несущим вдвое меньший заряд, чем первый, то силы должны тоже находиться в отношении 2:1. Если этот результат справедлив для выбранного отношения, то он будет справедлив и для любого другого отношения зарядов, и, следовательно, должен выполняться общий закон. Этот метод, разумеется, неприменим к магнетизму, ибо не существует метода разделения магнитных полюсов.

Нужно, однако, понимать, что закон Кулона не может выполняться в действительности абсолютно точно. Если бы это было так, то не было бы силы взаимодействия между заряженными и незаряженными телами, а ведь именно существованию такой силы обязано открытие электричества. Мы не рассматриваем, впрочем, эти поляризационные силы, так как это увело бы нас слишком далеко за рамки нашей книги.

Значительно более точный, хотя и не столь непосредственный метод проверки закона обратной пропорциональности квадрату расстояния для взаимодействия электрических зарядов предложил Кавендиш примерно в 1774 г. Метод его сводится просто к доказательству того, что электрическое поле внутри полого заряженного шара равно нулю. Можно показать, что этот результат имеет место только при выполнении закона обратной пропорциональности квадрату расстояния. Точность, с которой этот закон может быть проверен, зависит только от чувствительности детектора поля. Сейчас показатель степени при расстоянии в законе Кулона принято считать равным 2 с точностью 10^{-7} ; такая точность выходит далеко за пределы экспериментальных возможностей, которыми располагал Кулон.

К концу XVIII столетия сведения о магнетизме и электричестве стали значительно более обширными и упорядоченными, чем в начале столетия. В руках таких

людей, как Кавендиш и Гаусс (1777—1855), проблемы магнетизма и электричества начали поддаваться теоретическому анализу и смогли, таким образом, занять прочное место в качестве одного из разделов физики. Дело в том, что для интерпретации данных, добытых в эксперименте, всегда приходится прибегать к математике. Это, конечно, не значит, что математика играет роль заместителя физики, — математика представляет собой самостоятельную науку. Но если мы применяем математические методы к изучению физического мира, то сначала должны уяснить физический смысл рассматриваемых явлений.

Самую важную часть наших сведений об электричестве еще предстояло получить. Речь идет об эффектах, которые обнаруживает электричество в движении. Как это обычно бывает в физике, открытие таких эффектов оказалось не прямым; оно было сделано не путем наблюдения за перемещением заряда, ибо любой заряд, получаемый обычно трением, слишком мал, чтобы произвести заметный эффект. Открытие было сделано в 1786 г. анатомом Гальвани (1737—1798) самым необычным образом. Опыт Гальвани предшествовал целой серии замечательных экспериментов, проделанных сначала в Италии, а потом в других странах, в частности в Англии. Эти эксперименты в конечном счете изменили образ жизни человечества. Никакая другая область физики не оказала такого влияния на жизнь людей. Эксперименты, о которых идет речь, возвестили появление электрической промышленности — наиболее характерной черты современной цивилизации.

К сожалению, неизвестно точно, как именно Гальвани сделал свое открытие: видимо, он сам рассказал несколько версий разным людям. Это очень жаль, потому что открытие было в высшей степени необычным, и представляет несомненный интерес выяснить, как оно было сделано в действительности. Во всех версиях рассказа фигурируют одни и те же участники эксперимента: сам Гальвани, его жена, только что ампутированная конечность лягушки и стальной скальпель. В те времена специализация в полном смысле этого слова отсутствовала, и в лаборатории Гальвани имелись как анатомические, так и физические приборы. Жена Гальвани как будто заметила, что конечность лягушки, когда ее касались острием скальпеля,

иногда дергалась; это явление она связала с расположенной поблизости заряженной лейденской банкой (стр. 114).

Замеченный эффект был непостоянным, и явно существовал какой-то невыясненный фактор. После длительных поисков Гальвани обнаружил, что все зависело от того, как он держал скальпель: если рука касалась лезвия или одной из заклепок ножа, то нога лягушки дергалась, если же рука касалась только костяной ручки, то судорог не было. Гальвани был озадачен и решил выяснить, не причастно ли к наблюдаемому эффекту атмосферное электричество. Он подвесил задние конечности лягушки к наружной железной решетке своего дома, но ничего не произошло. Устав от ожидания, Гальвани надавил на крючки, которые были сделаны из латуни, и заметил, что иногда мышцы конечностей лягушки сокращались. Однако эффект, по-видимому, не был систематическим. Гальвани решил вернуться к опытам в закрытом помещении в условиях, которые в большей степени зависели от самого экспериментатора. Он положил конечности лягушки на железную дощечку, и когда он прижимал латунные крючки к дощечке, мышцы конечности сокращались *всегда*. В этом был ключ к разгадке — в контакте двух разных металлов. Другие металлы тоже давали эффект, изоляторы же, вроде стекла, не вызывали никакого сокращения мышц.

Какова бы ни была подлинная история открытия Гальвани, нужен был гениальный ум, чтобы из нагромождения разнообразной информации сделать вывод, что эффекты, создаваемые электрическими зарядами, можно получить просто при соприкосновении двух разнородных металлов.

Гальвани, видимо, вернулся к своей анатомии, так как его имя больше не появлялось в научных публикациях на эту тему. Но его открытие дало толчок длинной цепи событий. Его соотечественник Вольт (1745—1827), идя по следам открытия, отошел от анатомии и свел изучаемый вопрос к чистой физике. Вольт пришел к заключению, что требуется лишь одно — контакт между двумя металлами, разделенными каким-нибудь слабопроводящим веществом вроде жидкости в конечности лягушки. Следуя своему выводу, Вольт изготовил первый электрический элемент, состоявший из цинковой и медной пластинок, разделен-

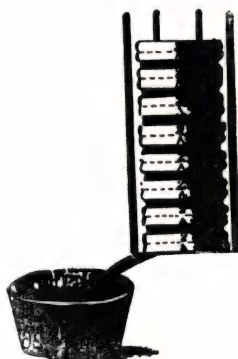
ных лоскутком ткани, пропитанным соленой водой или разбавленной кислотой.

В 1775 г. он опубликовал описание устройства, которое называют «вольтов столб», — цилиндрического столбика из пар медной и цинковой пластинок, разделенных влажными кружками из ткани (фиг. 25).

Вольта изготовил и другой прибор, который был назван «венок из чашек». В каждую чашку с раствором соли были опущены полоски из цинка и серебра, и все чашки были соединены друг с другом проволокой. 30 таких элементов, соединенных вместе, создавали ощутимый электрический удар и позволяли получить такое количество теплоты, которого было достаточно, чтобы расплавить довольно толстую проволоку.

Нужен был какой-то термин для обозначения электрической «силы», которую развивали эти элементы. Ее можно уподобить давлению, создаваемому разностью уровней воды. Поскольку вода на верхнем уровне имеет более высокий потенциал, мы можем назвать эту электрическую «силу» электрической разностью потенциалов, или, поскольку она заставляет течь ток, *электродвижущей силой*. В честь Вольта единицу измерения электрического потенциала называли *вольт*, а разность потенциалов, или напряжение, называют иногда *вольтажем*.

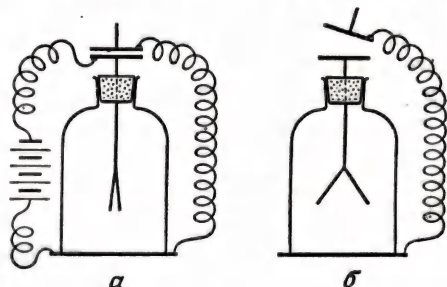
Природа «флюида», который получался из вольтова столба, все еще вызывала некоторые сомнения. Тот факт, что он создавал удар, не был исчерпывающим доказательством того, что это на самом деле электричество, и требовался более убедительный эксперимент. Такой эксперимент можно провести с помощью электроскопа с золотыми листочками, изобретенного в 1787 г. Беннетом (1750—1799). Чувствительным элементом этого прибора служит пара скрепленных друг с другом вверху листочков из золотой фольги, которые отталкивают друг друга, когда им передается электрический заряд. Потенциала, создаваемо-



Ф и г. 25. Вольтов столб.

го вольтовым столбом, недостаточно, чтобы вызвать отклонение листочков: большая энергия, которую выделяет вольтов столб, обусловлена непрерывностью его действия, а не высоким напряжением. Посмотрим, нельзя ли увеличить напряжение столба.

Это можно сделать, используя конденсатор, одна из пластин которого соединена с электроскопом. Подключим к обеим пластинам вольтов столб (фиг. 26, а). Если мы начнем разводить пластины, отсоединив предварительно



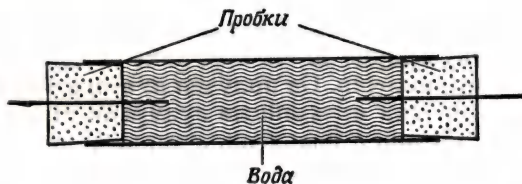
Ф и г 26. Метод электроскопа с конденсатором, позволяющий установить одинаковость природы гальванического электричества и электричества, получаемого трением.

вольтов столб, то листочки электроскопа разойдутся (фиг. 26, б). Я затрудняюсь сказать, кто первый произвел этот опыт, но, во всяком случае, он убедительно доказывает, что оба рода электричества в действительности одно и то же. Возможно, что этот эксперимент вначале не был понят, поскольку он связан с теорией конденсатора, появившейся позднее. Дело заключается в следующем. Электроскоп с листочками указывает разность потенциалов, а при уменьшении емкости потенциал заряда возрастает и становится достаточным, чтобы вызвать отклонение листочков.

Столб Вольта и его батарея из чашечных элементов были замечательными «игрушками». Многие делали их у себя и проводили увлекательные опыты. Но могли ли они содействовать дальнейшему развитию науки? Один ответ на этот вопрос был дан в 1800 г., когда Никольсон и

Карлейль открыли электролиз. Карлейль изготовил вольт-столб из 17 полукроновых монет (тогда их делали из настоящего серебра) и 17 цинковых пластинок, разделенных кружками картона, пропитанными соленой водой. С помощью какого-то умножителя напряжения экспериментаторам удалось показать, воспользовавшись электроскопом с золотыми листочками, что серебряный конец столба заряжен отрицательно, а цинковый — положительно.

Никольсон и Карлейль удостоверились в том, что вольт-столб не действует через материалы вроде стекла, но



Фиг. 27. Схема прибора Никольсона и Карлейля для исследования электролиза воды.

действует через металлы. Для большей надежности контакта они поместили каплю воды на пластину, которой касалась проволока, и заметили образование мелких пузырьков газа, имевшего, по их утверждению, запах водорода. Тогда Никольсон и Карлейль проделали специальный эксперимент. Они взяли стеклянную трубку, закрыли ее с обоих концов пробками и пропустили проволоочки через каждую пробку (фиг. 27). Трубка была заполнена водой, а проволоочки присоединялись к противоположным концам вольт-столба. Когда была взята латунная проволочка, то наблюдался непрерывный поток пузырьков газа от конца проволоочки, присоединенного к серебру, а у другого конца заметно было помутнение. Когда латунную проволочку заменили платиновой, газ выходил у обоих концов. Никольсон и Карлейль правильно заключили, что им удалось разложить воду на ее составные части — кислород и водород.

Значение этого явления как в практическом, так и в теоретическом отношении трудно переоценить. Здесь нас,

однако, не интересует практическая сторона вопроса, а теоретическое значение его мы рассмотрим в гл. 10. Сейчас нам нужно лишь отметить, что явление электролиза послужило еще одним доказательством того, что электростатика и «гальванизм» связаны между собой, ибо оказалось возможным разложить воду, пропустив через нее разряд от электрической машины.

Этот эксперимент провел в 1801 г. Волластон (1766—1828). Он понимал, что эффект должен быть слабым и что газ можно будет увидеть отчетливо только в том случае, если он будет выделяться у острия. Поэтому Волластон взял тонкую золотую проволоку с заостренным концом, впаял ее внутрь стеклянной капиллярной трубочки и ставил трубочку с торца до тех пор, пока не показалось острие золотой проволоочки. Он получил от этого острия искры под водой и заметил мельчайшие пузырьки газа, выделявшиеся одновременно с появлением искр. Теперь не могло быть никакого сомнения, что явление «гальванизма» представляло собой просто непрерывный поток электричества — электрический ток.

Вольтов столб занимал воображение ученых несколько лет. Они соперничали друг с другом, изготовляя батареи все больших размеров и лучшего качества, расплавляя все более крупные куски металла и изобретая разнообразные методы электрической сигнализации. Но подспудно блуждала мысль о том, что должна существовать связь между магнетизмом и электричеством, и в общем странно, что открытие этой связи заставило себя ждать 20 лет. Удивительно потому, что связь эта чрезвычайно проста, что ее искали и средства для ее обнаружения уже были под рукой. По сравнению с открытием Гальвани открытие этой связи было детской забавой. И тем не менее к нему пришли не сразу. Возможно, ученые того времени слишком увлеклись новой «игрушкой», которую придумал для них Вольта.

Открыл магнитное поле, окружающее ток, в 1820 г. Эрстед (1777—1851). Рассказывают, что он сделал это открытие во время лекции, на которой рассматривал связь между магнетизмом, «гальванизмом» и электричеством. Эрстед поместил компас вблизи от проволоки, проходившей параллельно стрелке, и когда по проволоке пошел

ток от батареи, стрелка компаса отклонилась и приняла направление восток — запад. Этот простой эксперимент послужил началом развития новой ветви естествознания — учения об электромагнетизме.

Открытие Эрстеда сразу же проверили другие ученые, и при этом были сделаны важные изобретения. Араго в том же 1820 г. изобрел электромагнит, пропустив ток через проволоку, намотанную на железный стержень. Ампер (1775—1836) пришел к заключению, что параллельные токи притягивают друг друга, и подтвердил свой вывод экспериментально. А в 1821 г. Фарадей (1791—1867), величайший гений эксперимента, заставил магнит непрерывно вращаться вокруг проводника с током и, таким образом, по существу построил первый электромотор.

Другое важное следствие работы Эрстеда заключалось в том, что она давала объективный метод измерения электричества. Некоторые из первых исследователей полагались на оценку силы получаемого ими электрического удара, теперь можно было измерять отклонение стрелки компаса. Это позволило перейти к изучению предмета на количественной основе, и тем самым был открыт путь к созданию законченной теории электродинамики.

Первый вопрос, который может быть задан, формулируется следующим образом: как зависит ток от рода батареи и от природы проводника, по которому он течет? Мы знаем теперь, что ответом на этот вопрос является закон Ома. Опять-таки этот закон, как и газовые законы (стр. 53), выглядит настолько просто, что трудности, которые пришлось преодолеть при его установлении, упускают из виду и забывают. Закон Ома *нелегко* проверить, и его нельзя рассматривать как очевидную истину; действительно, для многих материалов он не выполняется.

В чем же все-таки заключаются эти трудности? Разве нельзя проверить, что дает изменение числа элементов вольтова столба, определяя ток при разном числе элементов? Дело в том, что, когда мы берем разное число элементов, мы меняем всю цепь, ибо дополнительные элементы имеют и дополнительное сопротивление. Поэтому необходимо найти способ изменять напряжение, не меняя самой батареи. Кроме того, разный по величине ток нагревает

изготовленные из двух медных проволок, припаянных к поперечному стержню из висмута; m и m' — чашечки со ртутью, к которой можно было подключать термоэлементы. К чашечкам подсоединялся проводник, концы которого каждый раз зачищались перед тем, как погружались в ртуть: Ом отдавал себе отчет в важном значении чистоты материалов. Ом держал спай a в кипящей воде, а спай a' опускал в смесь льда с водой и наблюдал отклонение гальванометра. Типичную немецкую тщательность и внимательное отношение к деталям, характерные для Ома, можно противопоставить почти мальчишескому энтузиазму, который проявлял в своей работе Фарадей. В физике нужны оба подхода: последний обычно дает толчок к изучению какого-либо вопроса, а первый требуется, чтобы тщательно изучить его и на основе точных количественных результатов построить строгую теорию.

Ом использовал в качестве проводников восемь отрезков медной проволоки различной длины. Сперва ему не удалось получить воспроизводимые результаты, но неделю спустя он, очевидно, отрегулировал прибор и получил серию отсчетов для каждого из проводников. Эти отсчеты (табл. 7) представляли собой углы закручивания нити подвеса, при которых стрелка возвращалась на нуль. Ом показал, что при надлежащем выборе постоянных A и B длина x и угол закручивания X нити связаны соотношением

$$X = \frac{A}{B+x}.$$

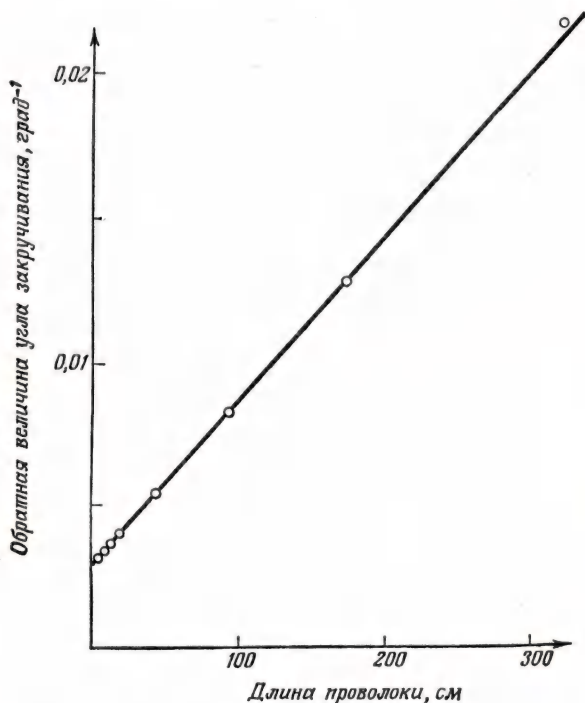
Можно проиллюстрировать это соотношение, построив график зависимости x от $1/X$ (фиг. 29).

Таблица 7

Сводка результатов Ома

Длина x	5	10	15	25	45	85	165	325
Закручивание X (наблюдаемое)	305	282	$258\frac{1}{2}$	$223\frac{1}{2}$	178	$124\frac{3}{4}$	78	44
Закручивание X (расчетное)	$305\frac{1}{2}$	$280\frac{1}{2}$	259	$224\frac{3}{4}$	$177\frac{3}{4}$	$125\frac{1}{4}$	79	45

Ом повторил свой эксперимент с латунной проволокой и получил такой же результат при другом значении A и том же значении B . Он взял для спаев термоэлемента температуры 0 и $7,5^\circ$ по Реомюру ($9,4^\circ \text{C}$) и обнаружил, что регистрируемые им отклонения уменьшились примерно



Ф и г. 29. График, построенный по результатам Ома.

в 10 раз. Таким образом, если предположить, что напряжение, которое дает прибор, пропорционально разности температур — как мы теперь знаем, это приблизительно верно, — то получается, что ток пропорционален этому напряжению. Ом показал также, что ток обратно пропорционален некоей величине, зависящей от длины проволоки; Ом назвал ее *сопротивлением*, и следует предполо-

жить, что величина B представляет собой сопротивление остальной части цепи.

Таким образом, Ом показал, что ток пропорционален напряжению и обратно пропорционален полному сопротивлению цепи. Это был замечательно простой результат для сложного эксперимента. Так по крайней мере должно казаться нам сейчас. Современники Ома, в особенности его соотечественники, полагали иначе: возможно, именно простота закона Ома вызывала у них подозрение. Ом столкнулся с затруднениями в служебной карьере, испытывал нужду; особенно угнетало Ома то, что не признавались его труды. К чести Великобритании, и в особенности Королевского общества, нужно сказать, что работа Ома получила там заслуженное признание. Ом входит в число тех великих людей, имена которых часто встречаются написанными с маленькой буквы: название «ом» было присвоено единице сопротивления.

Величайшим из экспериментаторов считают Фарадея. С чем это связано? В конце концов, он был всего лишь одним из плеяды великих ученых. Дело в том, что работы других ученых — Кулона, Гальвани, Эрстеда, Араго, Ампера — представляли собой отдельные «пики», тогда как Фарадей воздвиг «горную цепь» из взаимосвязанных работ. Начав исследовать какой-либо вопрос, Фарадей с гениальной способностью определял ключевые направления поиска. Даже когда он, казалось бы, просто повторял то, что сделали другие, — мы увидим это позже, когда будем рассказывать об электролизе (стр. 158), — его работы приобретали фундаментальное значение для науки. У Фарадея был инстинкт, помогавший ему свести вместе звенья какого-нибудь вопроса и создать из них законченное целое. И хотя Фарадей не был математиком, он умел, как мы также увидим, вдохновить других ученых на высочайшие достижения в области теории.

Интересные отношения существовали у Фарадея с Ампером. Фарадей был экспериментатором высшего класса, Ампер был выдающимся теоретиком. Они писали друг другу длинные письма о ходе своей работы, но на каждого из них идеи другого, по-видимому, не оказывали никакого влияния. Для них было достаточно излагать свои идеи на бумаге и не было необходимости в том, чтобы их

оценили. Это было так, словно каждый писал на языке, непонятном другому (имеются в виду не английский и французский, а язык эксперимента и язык теории).

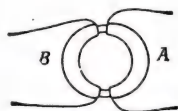
Оба ученых поставили себе задачу найти связь между магнетизмом и электричеством: если электричество создает магнетизм, то магнетизм должен создавать электричество. Но Ампер скоро сдался и даже пытался убедить Фарадея поступить так же. Рассуждения Ампера носили в значительной степени метафизический характер. «Тем самым, — говорил он, — мы свели бы воедино две разнородные вещи, тогда как фундаментальное действие по необходимости должно возникать между двумя сущностями одной и той же природы, такими, как два элемента тока». Гордость, которую испытывал Ампер от собственного результата — вывода о притяжении параллельных токов (стр. 123), — заслоняла от него возможность других выводов.

Однако Фарадей знал, что все же *существует* нечто такое, что необходимо найти, и искал это нечто 11 лет. Разумеется, эти поиски велись с перерывами. Фарадей был занят множеством других дел. Работу его затрудняло отсутствие необходимых материалов, таких, как провод с изоляцией, которым мы сегодня пользуемся не задумываясь. Кроме того, ему приходилось самому изготавливать большую часть аппаратуры, и многие приборы не обладали достаточной чувствительностью, чтобы реагировать на те слабые эффекты, которые он искал. В некоторых случаях схема эксперимента Фарадея должна была дать успешный результат, но, не ожидая получить кратковременные эффекты, он вместе с тем сам был слишком «инерционен», чтобы их заметить. Ту же ошибку допускали и другие исследователи. В 1825 г. Колладон (1802—1892) проводил эксперимент, который должен был дать то, что нужно¹⁾. Но чтобы наверняка исключить влияние мощного магнита, которым он пользовался, на гальванометр, Колладон отнес последний в другую комнату. К тому времени, как он не спеша заходил в эту комнату, чтобы взглянуть на гальванометр, всякое движение стрелки прекращалось. Предосторожностей иногда может оказаться слишком много!

¹⁾ Мгновенное отклонение стрелки гальванометра при выдвижении магнита из катушки. — *Прим. ред.*

О работах Фарадея мы знаем много, потому что он аккуратно вел дневник. Расскажем лишь о заключительном эксперименте, увенчавшемся успехом в 1831 г., спустя 11 лет после открытия Эрстеда. Фарадей пришел к выводу, что искомый эффект можно обнаружить, только если значительно усилить его. В то время уже можно было изготовить довольно мощные электромагниты. Почему бы в таком случае не получить магнетизм электрическим путем и не попытаться обнаружить электрические эффекты на том же самом железном сердечнике? Фарадей изготовил кольцо из мягкого железа примерно 2 см шириной и 15 см диаметром и намотал много витков медной проволоки на каждой половине кольца (фиг. 30). (Эту катушку Фара-

Ф и г. 30. Рисунок Фарадея, изображающий катушку, с помощью которой он открыл явление электромагнитной индукции.



дей держит в руках на фотографии, запечатлевшей статую, установленную в Королевском институте в Лондоне, фото IX.) Цепь одной обмотки замыкала проволока, проходившая над стрелкой компаса, удаленного настолько, чтобы не сказывалось действие магнетизма, созданного в кольце. Через вторую обмотку пропускался ток от батареи из 10 пар пластин.

Такова была схема опыта — весьма простая, с мало-чувствительным детектором. Фарадей располагал гораздо лучшими гальванометрами, но, возможно, он относился к этому эксперименту не более оптимистично, чем к многочисленным предварительным опытам, и выбрал для начала простейший детектор. Впоследствии можно было бы воспользоваться более чувствительными приборами, но Фарадей скоро увидел, что в этом не было необходимости. При включении тока стрелка компаса совершала несколько колебаний и успокаивалась; когда ток прерывали, стрелка снова колебалась. Фарадей нашел то, что искал.

При более внимательном наблюдении выяснилось, что стрелка вначале отклонялась в одну сторону при включении тока и в другую, когда ток прерывался. Эффект был достаточно большим. По словам Фарадея, когда он брал бата-



Фото IX. Статуя Фарадея с катушкой (см. фиг. 30), с помощью которой он открыл явление электромагнитной индукции.

рею из 100 пар пластинок, стрелка компаса делала четыре или пять оборотов. Фарадей получал даже маленькую искру. Он установил, что такие же эффекты можно получить с помощью обыкновенного магнита; он сделал спираль из проволоки, ввел в нее стержень из мягкого железа и, взяв два стержневых магнита длиной примерно по 60 см, образовал магнитную цепь (фиг. 31). При замыкании и размыка-



Ф и г. 31. Рисунок Фарадея, изображающий прибор, с помощью которого он доказал, что изменяющееся магнитное поле создает электродвижущую силу.

нии этой цепи стрелка компаса опять-таки отклонялась.

Все эти эффекты — непостоянные, быстропреходящие; установившиеся токи не дают никакого результата. Это и было причиной стольких неудачных опытов. Теперь мы понимаем, почему это должно быть так. Вскоре весть об экспериментах Фарадея стала распространяться наполовину в искаженном виде. Ампер заявил, что это очевидный результат, который может быть выведен из его электродинамической теории. Более того, Ампер утверждал, что он и Делярив открыли этот эффект в 1822 г. Однако никаких серьезных доказательств он не привел, и сегодня никто не сомневается в том, что честь открытия электромагнитной индукции принадлежит Фарадею.

Если кто другой и может претендовать на это открытие, так это американец Генри (1797—1878). Он открыл электромагнитную индукцию независимо, но к тому времени, когда стало известно об открытии Фарадея, еще не опубликовал своих результатов. Генри открыл также явление самоиндукции, сущность которого состоит в том, что при появлении и прекращении тока, текущего через катушку, в самой катушке наводится электродвижущая сила.

Явление электромагнитной индукции нашло многочисленные применения. Идея прибора Фарадея положена в основу индукционной катушки: намотав небольшое число витков толстой проволоки на одной стороне и много витков тонкой проволоки на другой, можно значительно повысить напряжение. С помощью какого-нибудь устрой-

ства, позволяющего все время прерывать ток, можно получить импульсы высокого напряжения, которые дают весьма впечатляющую серию искр. Если периодически изменять направление тока в первой (первичной) обмотке, то во второй (вторичной) обмотке получается такой же переменный ток, но другого напряжения. На этом основано действие трансформатора, который используют в наших системах электроснабжения для преобразования «переменного» тока одного напряжения в ток другого напряжения. Для передачи электроэнергии на расстояние требуется высокое напряжение, для безопасного применения электрического тока напряжение должно быть низким. Простота преобразования напряжения — главная причина применения переменного тока в системах распределения электроэнергии.

Но здесь нас интересует развитие самой физики, а не ее применения. Дали ли открытия Гальвани, Эрстеда и Фарадея возможность расширить наши физические представления о природе? Несомненно. В последних главах этой книги будет показано, насколько электрические и магнитные явления преобладают ныне в мире физики. Здесь же мы упомянем еще о трех открытиях, принадлежащих Фарадею.

Два из них очень схожи — это открытия парамагнетизма и диамагнетизма. К сороковым годам прошлого столетия ученые научились делать очень сильные электромагниты и соперничали друг с другом в том, чей магнит способен поднять больший вес. Фарадей был человеком не такого склада ума: он предпочитал искать новые явления и пытался выяснить, нельзя ли с помощью новых сильных магнитов обнаружить магнитные свойства у материалов, считавшихся немагнитными.

Это непростая задача. Дело в том, что магнитные свойства железа настолько сильны, что даже ничтожная примесь железа в любом материале способна совершенно изменить его магнитные свойства. Поэтому Фарадею пришлось уделить особое внимание чистоте материалов, которые он исследовал. Он установил, что многие материалы обнаруживают слабые ферромагнитные свойства. Когда же ученый подвесил между полюсами электромагнита стерженек из свинцового стекла (силикатное стекло с примесью бората свинца), он расположился поперек магнит-

ного поля, т. е. перпендикулярно к направлению, которое принял бы стержень из железа. Тщательная проверка показала, что эффект не зависит от свойств нитей подвеса или от какого-либо случайного положения стерженька в магнитном поле. Фарадей убедился, что им открыто новое магнитное свойство, которое заставляет вещество перемещаться в направлении областей магнитного поля, где поле слабее. Он назвал это свойство *диамагнетизмом*. Фарадей установил, что все материалы обладают магнитными свойствами двух родов: они ведут себя либо подобно свинцовому стеклу — такие материалы называют диамагнитными, либо подобно железу — таким материалам присвоено название парамагнитных. Ферромагнетизм представляет собой крайнюю форму парамагнетизма¹⁾.

Третье открытие было куда более необычным. Как Фарадей пришел к нему, установить нелегко, хотя известно, что он неустанно искал связь между разными областями физики. Это открытие, сделанное в 1845 г., заключалось в том, что магнитное поле способно поворачивать плоскость поляризации пучка поляризованного света.

Мы видели на стр. 78, как в начале XIX века было показано, что свет представляет собой поперечные волны; но в те годы никто не имел ни малейшего представления о том, что именно колеблется в световых волнах. Было много разговоров о «неосязаемом флюиде», которому присвоили название «эфир». Однако названия не решают проблем, и никогда нельзя предаваться иллюзии и считать, что мы понимаем какое-то явление только потому, что дали ему название. Подход Фарадея был более основательным. Его интересовало, существует ли связь между светом и каким-нибудь другим физическим явлением, скажем магнетизмом.

Фарадей придумал следующий эксперимент. Он пропустил пучок света, поляризованный в результате прохождения через призму Николя²⁾, между полюсами своего са-

¹⁾ Это неточно. Несмотря на сходные внешние проявления, парамагнетизм и ферромагнетизм имеют различную физическую природу. — *Прим. ред.*

²⁾ Призма Николя расщепляет луч света на два — обыкновенный и необыкновенный (стр. 72) — и поглощает один из них, так что из призмы выходит только полностью поляризованный необыкновенный луч. — *Прим. ред.*

мого большого электромагнита и проверил, воспользовавшись другой призмой Николя в качестве анализатора, не влияет ли как-нибудь включение тока на степень поляризации света. Никакого эффекта не наблюдалось. Тогда Фарадей попробовал ввести между полюсами магнита кусок свинцового стекла и опять не обнаружил никакого эффекта. Но правильно ли было приложено поле? Может быть, оно должно совпадать с направлением распростра-



Ф и г. 32. Рисунок Фарадея, изображающий прибор для демонстрации поворота плоскости поляризации поляризованного света при его прохождении через свинцовое стекло в магнитном поле.

нения света? Очевидно, с одним электромагнитом опыт поставить нельзя, ибо полюсы оказались бы на пути света, поэтому Фарадей использовал два электромагнита (фиг. 32). На этот раз эффект был обнаружен. Степень поляризации света как будто уменьшилась.

Полученный результат не был вполне убедительным, но он указывал верный путь для дальнейших поисков. Фарадей раздобыл более сильный электромагнит и провел новую серию опытов с несколькими кусками стекла. Одно из стекол с хорошо отполированными гранями дало «превосходный эффект». Если вторая призма Николя гасила поляризованный свет, когда тока не было, то при включении тока свет снова появлялся; можно было снова погасить свет, повернув призму Николя в новое положение. Фарадей установил, таким образом, что магнитное поле поворачивает плоскость поляризации падающего света.

Это был замечательный результат, поскольку не было никаких явных оснований считать, что между магнетизмом и светом должна быть связь. Но такая связь была, она стала понятной лишь почти 20 лет спустя, перед самой смертью Фарадея, когда Максвелл выдвинул электромагнитную теорию света (стр. 138).

9. Излучение

В предыдущих главах рассматривалось то, что можно было бы назвать «очевидной физикой». Употребив слово «очевидная», я не имел в виду, что наблюдать физические явления, о которых шла речь, мог бы *любой* человек. Я хотел лишь указать, что эти явления можно было исследовать с небольшой затратой времени и средств. Область этих явлений — обычная механика, молекулярная физика и т. д. — может быть отнесена к основам физики. Теперь мы должны спросить себя, является ли этот перечень явлений исчерпывающим. Существуют ли явления, которые мы можем наблюдать только в результате целых «охотничьих экспедиций»?

Этот вопрос может служить символическим введением в данную главу, поскольку исследованию излучений предшествовал вводный этап изучения света. Сегодня мы знаем, что видимый свет составляет ничтожную часть неизмеримо более широкого электромагнитного спектра. Тем не менее именно благодаря тому, что мы знали о существовании этой малой части спектра, были открыты другие формы излучения с необычными свойствами, исследование которых содействовало дальнейшему прогрессу физики. Но чтобы обнаружить эти излучения, потребовались немалые усилия. Все последующие разделы физики открывались с трудом, и чем дальше развивалась физика, тем большие требовались усилия. Этот тезис хорошо иллюстрируют открытия других форм излучения, дополняющих видимый свет.

Первое открытие сделал в 1777 г. Шееле (1742—1786), исследовавший действие различных участков спектра на хлористое серебро. Эта соль при облучении солнечным све-

том меняет свой цвет с белого на пурпурный, и Шееле хотел выяснить, не была ли какая-нибудь часть спектра особенно эффективной в этом отношении. Он установил, что действие усиливалось по мере приближения к крайней фиолетовой части спектра. Волластон доказал, что действует на хлористое серебро на самом деле та часть спектра, которая лежит за пределами фиолетовых лучей. В 1842 г. А. Э. Беккерель (1820—1891) «сфотографировал» ультрафиолетовый спектр Солнца, подвергнув действию этой части спектра бумагу, пропитанную хлористым серебром, и продемонстрировал существование большого числа фрунгоферовых линий (стр. 87).

Исследования ультрафиолетового спектра сдерживались свойствами призм, использовавшихся для разложения света в спектр: хотя стекло прозрачно для видимого света, оно непрозрачно для ультрафиолетовых лучей. Эту трудность удалось обойти благодаря применению отражательной дифракционной решетки. Сейчас ультрафиолетовое излучение изучено в очень широком диапазоне и находит большое применение.

Ну а что можно сказать о другом конце спектра? Обладает ли эта часть спектра какими-нибудь свойствами, которые позволили бы ее обнаружить? Ответ на этот вопрос получил в 1800 г. Гершель. Он интересовался нагревательной способностью лучей различных цветов спектра и направлял их на зачерненный шарик чувствительного термометра. Гершель установил, что тепловой эффект усиливается в направлении к красному концу спектра, причем продолжает усиливаться за его пределами: это уже действует инфракрасная часть спектра.

В 1840 г. Гершель придумал способ «фотографирования» спектра солнечного света по его нагревательной способности. Он покрыл полоску бумаги клеем и ламповой копотью, чтобы она хорошо поглощала тепло, окунул ее в спирт и направил на нее разложенный в спектр солнечный свет. Там, где полоска получала больше тепла, спирт испарялся быстрее, и можно было наблюдать спектр в виде полосы с переменной влажностью. «Фотография» эта была не слишком хорошей и не отличалась стойкостью, но она служит замечательным примером того, сколько остроумия может проявить при желании экспериментатор. Гер-

шель обнаружил таким путем новые фFraунгоферовы линии в инфракрасной области спектра.

Зная, что солнечный спектр выходит за пределы обоих концов области видимого света, легко представить себе, что он может простирается и дальше. Нет никаких оснований ожидать, что можно вообще обнаружить пределы. Но поскольку мы видели, что все три свойства — зрительный эффект, тепловой эффект и химическая активность — относятся только к определенным частям спектра, мы не знаем, какие еще свойства можно было бы использовать для дальнейших поисков. Как часто бывает в физике, ответ пришел совсем с другой стороны.

В конце прошлой главы мы рассказали о том, что Фарадей доказал существование связи между светом и магнетизмом. Этот и другие проделанные им опыты заставили его задуматься над природой световых волн, но, будучи прирожденным экспериментатором, Фарадей не имел обыкновения писать теоретические труды и не стремился излагать свои мысли на бумаге. Однажды для этого представился случай при неожиданных и довольно забавных обстоятельствах.

В Королевский институт, руководимый тогда Фарадеем, был приглашен Уитстон — тот самый, по имени которого назван мостик Уитстона, — прочесть лекцию на одном из традиционных вечерних семинаров, проводившихся по пятницам. Эти семинары были и по-прежнему остаются довольно важным событием, и Уитстона это до некоторой степени страшило; когда подошло время начала лекции, его нигде не могли найти. У Фарадея были записи Уитстона, и он был вынужден прочесть лекцию вместо него. Как это часто бывает, когда при чтении лекции пользуются чужими записями, лекция оказалась очень короткой, и Фарадей решил заполнить время, изложив кое-какие свои идеи. На аудиторию это произвело большое впечатление, и Фарадея убедили написать статью для журнала «*Philosophical Magazine*»¹⁾. Статья называлась «Размышления о колебаниях лучей» и была опубликована в 1846 г.

¹⁾ «Философский журнал» — один из наиболее известных английских физических журналов, выходящий и по сей день. — *Прим. ред.*

В этой статье Фарадей рассмотрел природу колебаний, которые составляют свет. Он задал вопрос, не имеют ли они отношения к силам, которые связывают друг с другом атомы, и, таким образом, позволил нам избавиться от представления об эфире. Фарадей рассматривает далее «два тела A и B , удаленные друг от друга, которые испытывают взаимное действие и, следовательно, связаны силовыми линиями...; если одно из тел совершает малейшее перемещение вправо или влево или если источник его действия сместить на мгновение внутри самого тела (оба случая нетрудно реализовать, если A и B — электрические или магнитные тела), то результирующая сила, которой мы интересуемся, испытает действие, равносильное поперечному возмущению». Другими словами, Фарадей поставил вопрос, не могут ли его силовые линии — представление, которое ввел Фарадей и которым пользуются с тех пор физики, — передавать волны, подобно натянутым струнам.

Эта идея побудила Максвелла (1831—1879) рассмотреть задачу более глубоко; он был замечательным математиком и сумел перевести идеи Фарадея на математический язык. В статье, опубликованной в 1864 г., за три года до смерти Фарадея, Максвелл показал, что возмущение, которое имел в виду Фарадей, должно привести к возникновению волны и что эта волна должна перемещаться с конечной скоростью. Величина этой скорости зависит от постоянных, входящих в уравнения Кулона для электростатических и магнитных сил (стр. 116).

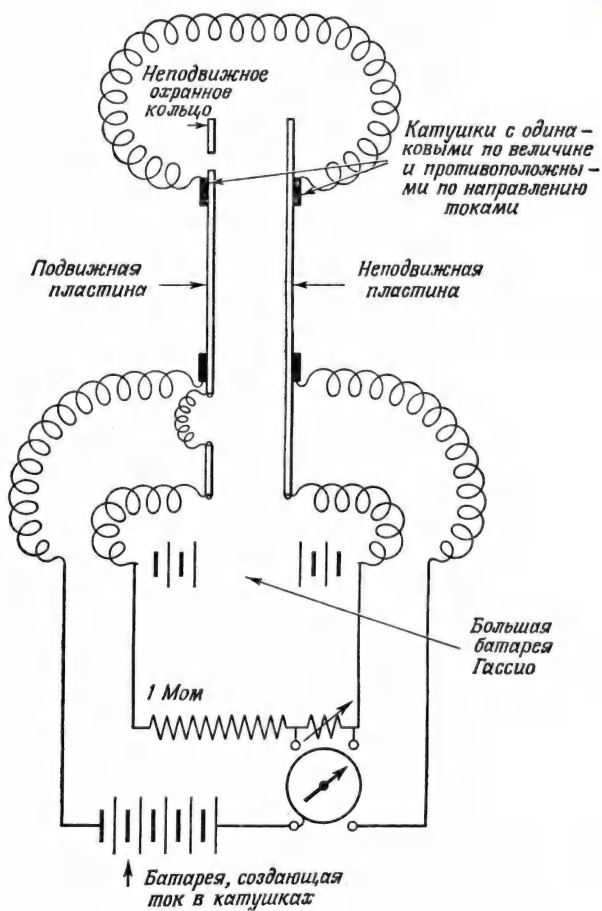
Существует известная трудность в том, чтобы точно определить, что следует понимать под силовыми постоянными в уравнениях Кулона. Многие учебники начинают с того, что приравнивают единице постоянные в уравнениях для силы электрического и магнитного взаимодействия. Таким образом получают две системы единиц: уравнение для силы взаимодействия между двумя электрическими зарядами дает одну систему, известную под названием электростатической, а уравнение для силы взаимодействия между двумя токами — другую, называемую электромагнитной. Однако, поскольку токи представляют собой просто движущиеся заряды, обе системы должны быть связаны между собой. Максвелл понял это и в 1868 г. нашел

связь между обеими системами экспериментально. Он был не только замечательным теоретиком, но и превосходным экспериментатором.

Метод Максвелла был основан на уравнивании силы притяжения между двумя пластинами, к которым прикладывалось высокое напряжение, и силы отталкивания между двумя катушками, по которым проходил ток в противоположных направлениях (стр. 123). Аппаратура Максвелла показана на фиг. 33. Напряжение к пластинам прикладывалось от «большой батареи Гассио» из 2000 элементов и измерялось путем пропускания тока от батареи через точно известное сопротивление порядка 1 МОм при помощи гальванометра с переменным шунтом. Гальванометр имел вторую катушку, через которую пропусклся ток, проходивший через взаимно отталкивающиеся катушки. Подвижная пластина с подвижной катушкой крепилась к коромыслу крутильных весов (стр. 115) для регистрации малейшего нарушения равновесия. Эксперимент состоял в следующем. Расстояние между пластинами изменялось до тех пор, пока крутильные весы не приходили в равновесие; после этого подбиралось сопротивление шунта гальванометра так, чтобы гальванометр показывал нуль. Для повышения точности подвижная пластина была снабжена неподвижным охранным кольцом, а на противоположном конце коромысла крутильных весов располагался еще один комплект катушек с целью исключить любой эффект магнитного поля Земли.

Было снято двенадцать совокупностей отсчетов при разных расстояниях между пластинами от 1,2 до 2,5 см, и был получен средний результат $2,779 \cdot 10^{10}$ см/с. Ранее, в 1856 г. Вебер и Кольрауш проделали то же измерение другим методом, не придавая ему теоретического значения; их результат был $3,107 \cdot 10^{10}$ см/с. Учитывая, что Фуко (стр. 86) получил для скорости света значение $2,980 \cdot 10^{10}$ см/с, Максвелл пришел к выводу о количественном подтверждении его теории.

Выяснение природы света открыло возможности совершенно нового подхода к поискам других типов излучения. Поскольку речь шла об электромагнитном излучении, нельзя ли было получить его непосредственно? Нельзя ли было, следуя идее Фарадея, получить излучение, просто



Ф и г. 33. Схематическое изображение важнейших частей установки Максвелла, использовавшейся в его первом эксперименте по определению соотношения между электромагнитными и электростатическими единицами.

перемещая магнит или электрический заряд? При этом вдоль силовых линий должны были бы пробегать импульсы. Чтобы получить непрерывную волну, необходимо вызвать непрерывные колебания источника, и тут-то возникает первая трудность. Даже при самых высоких частотах, которые мы можем разумным образом получить механически — скажем, с помощью камертона, — длина волны была бы слишком большой, чтобы ее можно было измерить. Скорость представляет собой произведение частоты на длину волны, так что при скорости $3 \cdot 10^{10}$ см/с и частоте 10^4 с⁻¹ длина волны равна 30 км.

Требовался какой-то иной способ возбуждения колебаний. Необходимая основа для него была уже найдена Генри в эффекте, обнаруженном им в 1842 г. Речь идет об открытии колебательного характера разряда конденсатора. Разумеется, Генри в то время не понимал важности этого открытия и привел его в отчете о своей работе просто в качестве одного из пунктов. В этой работе Генри независимо от Фарадея открыл законы электромагнитной индукции (стр. 131).

Генри решил повторить некоторые опыты Савари. В 1826 г. Савари заметил, что если разряжать лейденскую банку через спиральную обмотку, внутрь которой введены стальные иголки, то иголки намагничиваются. Это еще раз доказывало, что электрический ток представляет собой движение зарядов (стр. 120). Но к удивлению ученого, не все иголки были намагничены в одном направлении. Это было весьма загадочно: если заряд проходил от конденсатора по катушке, то он должен был намагнитить иголки так, как если бы их ввели внутрь катушки, по которой пропускают ток.

Попытки Генри повторить наблюдения Савари оказались сначала безуспешными. Генри обнаружил, что все иголки намагничивались *в одном и том же направлении*. В чем могла быть разница между его экспериментом и опытом Савари? Может быть, дело было в размерах иголок? Генри взял гораздо более мелкие иголки, и опыт удался: иголки намагничивались в разных направлениях.

Эффект получился вполне реальный, но объяснение его было отнюдь не очевидным. В конце концов Генри нашел, в чем дело. Разряд конденсатора происходит не в

одном направлении, как выливается вода из кувшина, а имеет колебательный характер: электричество вытекает из конденсатора с «избытком», в результате чего конденсатор противоположно заряжается, снова разряжается, при этом идет ток противоположного направления и т. д. Разумеется, происходило постепенное затухание разряда, и в конечном счете он прекращался.

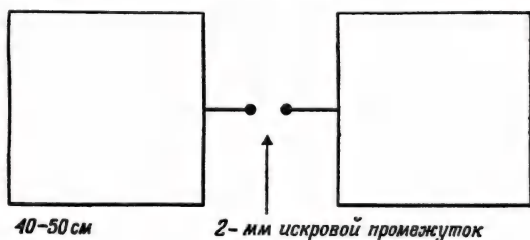
Как этим объяснить экспериментальные наблюдения? Первый цикл разряда самый сильный и должен сказываться на всех иглах. Так происходило в случае больших иглол. В случае же маленьких иглол должен был наступать предел вызываемой током их намагниченности, который мог быть значительно ниже той намагниченности, что получается при первом цикле разряда в противоположном направлении. При этом иглол не только размагничиваются, но и намагничиваются в противоположном направлении. В этом заключалось объяснение Генри наблюдаемых им эффектов, легшее в основу открытия колебательного характера разряда конденсатора. Таким простым путем был получен важный результат, который не только привел к появлению новых идей в физике, но открыл новую эру в области связи.

Дело в том, что появился метод получения быстрых переменных движений электрического заряда и, таким образом, волн, предсказанных Фарадеем и Максвеллом. Сколько раз до этого их, должно быть, получали экспериментаторы при разряде лейденских банок, но не было ни подходящего прибора для обнаружения этих волн, ни того человека, который понял бы, что при этом происходит.

Первым занялся всерьез этим вопросом Герц (1857—1894). Каждый, кто имел дело с высоковольтной аппаратурой, знает, как легко могут проскакивать искры между близко расположенными металлическими предметами, находящимися как будто бы под одним и тем же потенциалом. Многие до Герца наблюдали это явление, но именно Герц вполне оценил его значение и исследовал настолько досконально, что ни у кого не осталось никаких сомнений относительно справедливости теории Максвелла.

А некоторые сомнения были. Существовало общее мнение, что Максвелл был блестящим молодым ученым и сде-

лал изящную математическую работу, но многие считали, что она имеет небольшое значение для физики. Герц, однако, думал иначе, хотя он находил теорию Максвелла трудной для понимания. Герц знал о результате Генри, но решил, что любые волны, возникающие в результате разряда, должны быть слишком слабыми, чтобы их можно было обнаружить. Однако во время подготовки лекций по этому вопросу Герц установил экспериментальный факт, который заставил его рассмотреть задачу пристальнее: он заметил, что искры между соседними проводниками

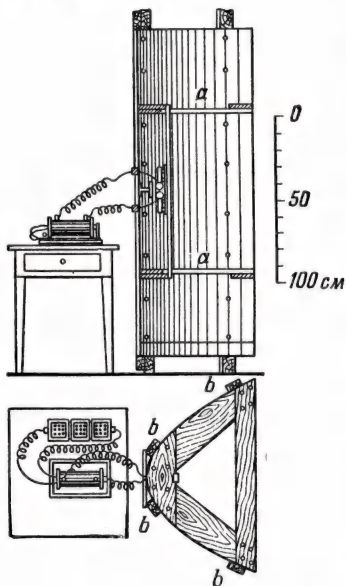


Ф и г. 34. Вибратор Герца.

были сильнее, если лейденская банка была меньше. Почему бы в таком случае не сделать действительно небольшой конденсатор, может быть, при этом удастся получить еще более сильный эффект? Герц изготовил вибратор — он изображен на фиг. 34 — из цинковых пластин размером приблизительно 40×40 см, достаточно удаленных друг от друга. Вибратор работал очень хорошо, легко образуя искры между соседними проводниками.

Но и после этого Герц не осознал полностью значения своей работы. Он думал, что возмущение электрического поля при разряде должно быть слишком бурным и нерегулярным, чтобы оно поддавалось точному исследованию. Герц считал, что получил просто электрический «шум». Продолжать исследование его заставил следующий простой факт: он нашел проводник, у которого удавалось извлекать искры на конце, а не в середине. Так был открыт узел электрических колебаний (см. стр. 65). Тогда Герц понял, что имеет дело с «четким и упорядоченным явлением». Он получил чистую волну, а не шум, как полагал.

Первые попытки Герца провести эксперименты с этими волнами оказались неудачными. Длина их была 4—5 м, и Герц вскоре понял, что детали его прибора были гораздо меньше и он воспринимал лишь рассеянное излучение (см. стр. 76). Поэтому он уменьшил размеры вибратора, чтобы



Ф и г. 35. Источник, использовавшийся Герцем для исследования свойств электромагнитных волн.

получить длину волны 40—50 см, и тогда установка заработала великолепно. На фиг. 35 показана зарисовка Герцем своей установки, где виден вибратор в фокусе параболического зеркала и детектор такого же устройства, дававший искры в искровом промежутке.

В 1888 г. Герц опубликовал статью, в которой описал множество замечательных результатов. Он продемонстрировал прямолинейное распространение электромагнитных волн, показав, что металлический экран прекращает искрение, в то время как изолятор, например деревянная дверь, не препятствует ему. Повернув одно зеркало на 90° , Герц показал, что волны поляризованы и, следовательно, являются поперечными. С помощью большой цинковой пластины он продемонстрировал отражение волн, хотя уже успешное применение зеркал, разумеется, доказывало существование этого свойства. Герц осуществил преломление волн, пропустив их через призму из твердого битума, и нашел показатель преломления, близкий к 1,7.

Можно себе представить, какое удовольствие доставила ему эта работа! Немногим дано испытать радость столь продуктивного труда и получить так много результатов в одном-единственном эксперименте. И, конечно, Герц заложил фундамент новой отрасли техники — радиосвязи.

Так известный электромагнитный спектр был расширен от длин волн порядка тысячных долей миллиметра до метров и десятков метров (радиоволны). С тех пор были получены как более длинные, так и более короткие волны, а пробелы в спектре заполнены. Между длинными инфракрасными волнами (стр. 136) и короткими радиоволнами нет принципиальной разницы.

А как обстоит дело с другим концом спектра, с областью за ультрафиолетом? Здесь открытие новых видов излучения отнюдь не было логическим продолжением прежних исследований. Это было излучение неизвестного вида — рентгеновские лучи со столь необычными свойствами, что установить их природу удалось не сразу. Оно оставалось загадкой в течение 17 лет, и только тогда удалось выяснить, что это — электромагнитное излучение с длинами волн, примерно в 1000 раз более короткими, чем длины волн света.

Чтобы рассказать об этом открытии, нам придется сначала вернуться к далеким временам — к наблюдению Пикара, который в 1675 г. заметил, что ртутный барометр, когда его переносили в темную комнату, испускал в своей вакуумной части вспышки света. Конечно, тогда никак нельзя было использовать это открытие; описанное явление, вероятно, наблюдалось много раз после этого и оставалось полнейшей загадкой. Только после открытия Фарадеем электромагнитной индукции и изобретения индукционной катушки (стр. 132) появилась возможность исследовать это явление систематически. Изготавливали длинные стеклянные трубки и откачивали их до различных давлений. Когда к трубкам прикладывали высокое напряжение, наблюдалось красивое разноцветное свечение (фото X).

Эти разрядные трубки, как их называли, представляют собой самые замечательные устройства в экспериментальной физике не только по внешним эффектам, но и по тем открытиям, которые были сделаны с их помощью. И кто поверит в столь часто высказывавшееся утверждение, будто физики XIX столетия думали, что приблизились к концу физики, тогда как они только столкнулись с этим новым явлением? Немногие из физиков могли бы обнаружить столь примитивное мышление.

В следующей главе мы более детально рассмотрим открытия, являющиеся следствием этого эксперимента, который, безусловно, надо считать самым плодотворным экспериментом в физике. Здесь же мы коснемся лишь одного эффекта, состоящего в том, что, когда давление уменьшалось, разряд становился слабее и непосредственно перед тем, как он прекращался, сама разрядная трубка окружалась зеленым свечением. Что же происходило?

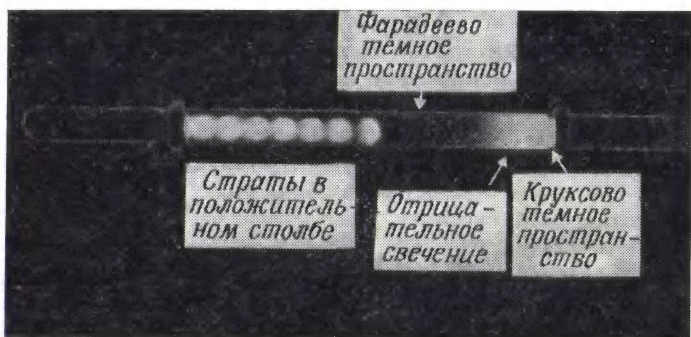


Фото X. Электрический разряд в воздухе при низком давлении.

Нужно помнить, что в конце XIX века разрядная трубка была прибором, возбуждавшим наибольший интерес у физиков, и с нею производили эксперименты в большинстве лабораторий мира. Из наблюдений такого нового явления непременно должны были последовать какие-то результаты, и вот в 1895 г. Рентген (1845—1923) сделал замечательное открытие. Все, кто изучает физику, должны запомнить эту дату — дату начала того, что мы теперь называем «современной физикой». Как бы ни назвали ее будущие поколения, изменение темпов развития физики с этого времени остается несомненным фактом.

Рентген экспериментировал с разрядной трубкой и заметил, что, когда давление в трубке уменьшали, лежавшее поблизости вещество (платиноцианид бария) начинало сильно светиться; сильнее всего оно светилось непосредственно перед тем, как пропадал разряд, когда вакуум становился слишком высоким, чтобы в трубке мог идти

ток. В том, что поблизости находилось названное соединение, нет ничего удивительного: оно было известно благодаря свечению (флуоресценции) в ультрафиолетовых лучах, и его можно было найти в большинстве физических лабораторий.

Рентген подумал, что свечение вызывалось ультрафиолетовыми лучами от трубки, и для проверки этого предположения заключил трубку в плотно закрывающуюся коробку из черного картона. К своему удивлению, он не заметил никакого уменьшения яркости свечения. Свечение можно было обнаружить даже тогда, когда экран был удален на два метра. Рентген сразу понял, что он открыл какой-то новый вид излучения, способного проходить через материал, не прозрачный для всех других видов излучения, кроме радиоволн (стр. 144).

Большинство ученых немедленно опубликовали бы такое открытие. Рентген же считал, что сообщение произведет большее впечатление, если удастся привести какие-то данные о природе открытых им лучей, измерив их свойства. Поэтому он провел шесть недель, напряженно работая и проверяя все предположения, которые только приходили ему в голову. Рентген доказал, что лучи исходили от трубки, а не от какой-либо другой части аппаратуры. Он показал, что большинство материалов прозрачно для нового излучения и некоторые материалы более прозрачны, чем другие. Книга в 1000 страниц едва поглощала это излучение; стекло, содержащее свинец, поглощало его в большей степени, чем обычное стекло; кости руки поглощали сильнее, чем мышечная ткань; платина поглощала сильнее, чем серебро или медь. Многие другие вещества, кроме платиноцианида бария, также испускали свечение под действием новых лучей — многие сорта стекла, кальцит и каменная соль.

Рентген сделал важное открытие, что лучи действуют на фотографическую эмульсию, и использовал этот эффект для иллюстрации некоторых из своих выводов. Рентгену не удалось обнаружить ни теплового действия новых лучей, ни какого-либо действия их на сетчатку глаза. Он приближал глаз вплотную к разрядной трубке — каждый, кто знает об опасном действии этих лучей на живую ткань, может прийти в ужас от подобного эксперимента!

Рентген не обнаружил преломления открытых им лучей в призмах, сделанных из алюминия и резины. Он не смог вызвать отклонения лучей электрическим или магнитным полями и не обнаружил никаких интерференционных явлений (стр. 77). Один положительный результат поисков ученого, к которому он пришел позже, заключался в том, что лучи разряжали наэлектризованные тела.

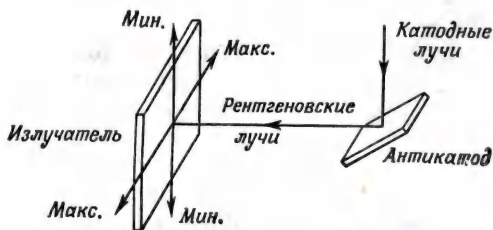
Таким образом, недели, потраченные Рентгеном на эксперименты, не привели ни к каким определенным результатам. Единственная закономерность, которую удалось ему установить, заключалась в том, что более тяжелые химические элементы поглощали лучи сильнее, чем легкие, в отличие от света, который полностью поглощается тонким слоем алюминия, но легко проходит через несколько сантиметров свинцового стекла. Помимо этого, ничего, видимо, не удавалось объяснить: новые лучи не были похожи ни на свет, ни на лучи¹⁾ в разрядной трубке, которые, например, легко отклонялись магнитом. Рентген опубликовал результаты своей работы и скромно назвал открытое им излучение «икс-лучами». Это открытие потрясло весь, не только научный, мир. Лучи Рентгена быстро нашли практическое применение в медицине и в технике, но проблема их природы оставалась одной из важнейших в физике. Рентгеновские лучи вновь возбудили спор между сторонниками корпускулярной и волновой природы света (стр. 72), и ставилось множество экспериментов с целью решить проблему.

Рентген установил, что открытые им лучи рассеиваются веществом главным образом на малые углы, хотя удавалось зарегистрировать рассеянное излучение малой интенсивности даже под углами больше 90° . В 1905 г. Баркла (1877—1944) провел измерения этих рассеянных лучей, воспользовавшись способностью лучей Рентгена разряжать наэлектризованные тела. Интенсивность лучей удавалось определить, измерив скорость, с которой под действием их разряжался электроскоп, скажем, с золотыми листочками (стр. 119). Баркла в блестящем экспе-

¹⁾ Катодные лучи, представляющие собой поток электронов (см. гл. 10).— *Прим. ред.*

рименте исследовал свойства рассеянного излучения, вызвав вторичное его рассеяние. Он нашел, что излучение, рассеянное на 90° , не удавалось снова рассеять на 90° (фиг. 36). Это убедительно свидетельствовало о том, что лучи Рентгена представляют собой поперечные волны.

Если это так, то какова их длина волны? Ученые пытались поставить дифракционные опыты на новом излучении, полагая, что длина его волны много меньше, чем у света. Ни один из этих опытов не принес успеха. Наиболее



Ф и г. 36. Схема эксперимента Баркла для демонстрации поляризации рентгеновских лучей.

значительной среди них оказалась работа Вальтера и Поля, проведенная в 1908 г. Эти ученые пытались воспроизвести в лучах Рентгена ньютоновскую дифракционную картину (стр. 75) на сужающейся щели. Они покрыли края щели золотом, чтобы обеспечить большое поглощение, и показали, что при ширине щели в самом узком месте $1/50$ мм имелись признаки уширения. Длина волны лучей должна была тогда быть порядка 10^{-8} см.

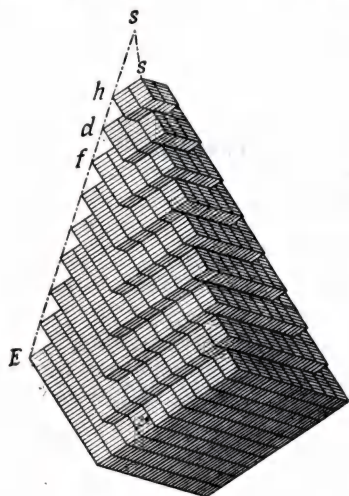
Сторонники корпускулярной точки зрения тоже не бездействовали. У. Г. Брэгг (1862—1942) считал свои данные доказательством того, что лучи Рентгена представляют собой частицы. Он повторил наблюдения Рентгена и убедился в способности рентгеновских лучей разряжать заряженные тела. Было установлено, что этот эффект обусловлен образованием ионов в воздухе. Брэгг установил, что отдельным газовым молекулам передается слишком большая энергия, чтобы передача ее могла осуществ-

ляться лишь малой частью непрерывного волнового фронта ¹⁾.

Этому периоду явных противоречий — ибо результаты Баркла и Брэгга невозможно было согласовать друг с другом — внезапно положил в 1912 г. конец один-единственный эксперимент. Этот эксперимент осуществлен бла-

годаря счастливой комбинации идей и людей и может считаться одним из величайших достижений в физике. О нем стоит рассказать как о примере того, что содружество талантов может оказаться значительно более эффективным, чем сумма достижений каждого из них.

Первый шаг был сделан, когда аспирант Эвальд (родился в 1888 г.) обратился к физiku-теоретику Лауэ (1879—1960) с просьбой объяснить, как понимать новую теорию прохождения волн через решетку из диполей. Лауэ спросил Эвальда, почему его интересует эта проблема. Эвальд ответил, что такую решетку представляет собой



Ф и г. 37. Рисунок Гаюи, иллюстрирующий внутреннее строение кристалла.

кристалл. Лауэ удивился: он, видимо, был незнаком с теориями кристаллов, возникшими за много лет до того [фиг. 37 иллюстрирует представление об образовании кристаллов из блоков, высказанное Гаюи (1743—1822) в конце XVIII столетия].

Идея Эвальда заинтересовала Лауэ. Зная, что подобная правильная структура могла бы действовать как дифракционная решетка (стр. 101), он спросил Эвальда, какого

¹⁾ Теория фотоэффекта Эйнштейна, в принципе приложимая к любому виду ионизации излучением, установила квантовый характер ионизации — ее зависимость от частоты, а не интенсивности волны. Иными словами, излучение при ионизации проявляет свои корпускулярные, а не волновые свойства. — *Прим. ред.*

размера могла быть отдельная ячейка кристалла. Эвальд не знал, но предположил, что она может быть порядка $1/500$ — $1/1000$ длины волны света. Вопрос показался Эвальду не имеющим отношения к делу, но он не мог позволить себе быть невежливым по отношению к человеку, к которому обратился за консультацией. Он не знал, что заронил в голову Лауэ идею.

Эта идея заключалась в следующем. Чтобы проверить, являются ли рентгеновские лучи волнами, нужно провести дифракционный опыт. Любая искусственная дифрагирующая система, вроде суживающейся щели Вальтера и Поля, заведомо слишком груба. Кристалл же является естественной дифракционной решеткой, значительно более мелкой, чем любая изготовленная искусственно. Не может ли происходить дифракция рентгеновских лучей на кристаллах?

Лауэ не был экспериментатором и нуждался в помощи. Он обратился за советом к Зоммерфельду (1868—1951), но тот не поддержал его, сказав, что тепловое движение (стр. 33) должно сильно нарушать правильную структуру кристалла. (Еще один пример того, как великий человек оказался неправ ¹⁾.) Зоммерфельд отказался разрешить одному из своих ассистентов, Фридриху (родился в 1883 г.), тратить время на подобные бессмысленные опыты. К счастью, Фридрих придерживался иного взгляда и с помощью своего друга Книппинга (1883—1935) втайне провел этот эксперимент. Они выбрали кристалл сульфата меди — эти кристаллы имелись в большинстве лабораторий — и собрали установку, показанную на фото XI.

Первая экспозиция не дала никакого результата; пластинка располагалась между трубкой — источником рентгеновских лучей — и кристаллом, поскольку считалось, что кристалл должен действовать как отражательная дифракционная решетка. Во втором опыте Книппинг настоял на том, чтобы расположить фотографические пластинки со

¹⁾ Тепловое движение, в самом деле, нарушает регулярность отражающих рентгеновские лучи атомов в кристалле. Но оно при обычных температурах лишь не очень существенно размывает пятна на рентгенограммах, отвечающие отражению большими группами атомных плоскостей в кристалле. Поэтому вообще получились рентгенограммы. — *Прим. ред.*

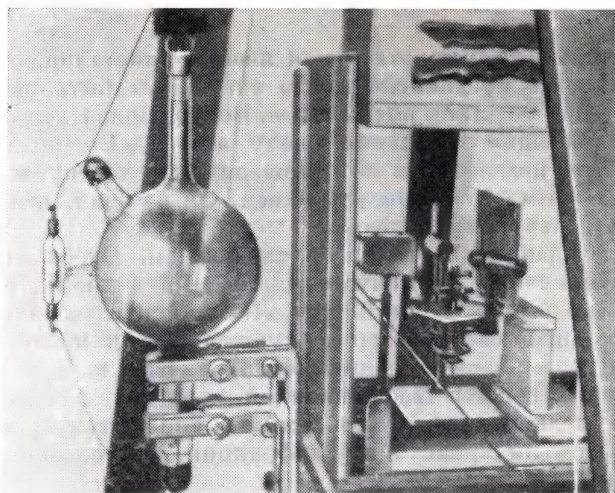


Фото XI. Установка Фридриха и Книппинга, на которой они выяснили способность кристаллов действовать как дифракционные решетки для рентгеновских лучей.

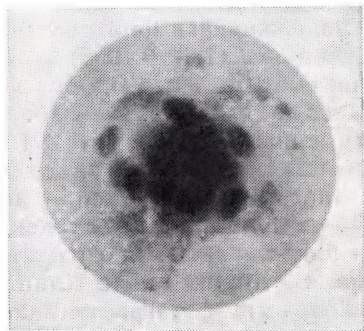


Фото XII. Первая фотография дифракции рентгеновских лучей на кристалле, снятая Фридрихом и Книппингом.

В эксперименте использовался кристалл пентагидрата сульфата меди.

всех сторон вокруг кристалла: в конце концов следовало учитывать любую возможность.

На одной из пластинок, расположенной за кристаллом на пути пучка рентгеновских лучей, был обнаружен эффект, который они искали (фото XII). Так была открыта дифракция рентгеновских лучей.

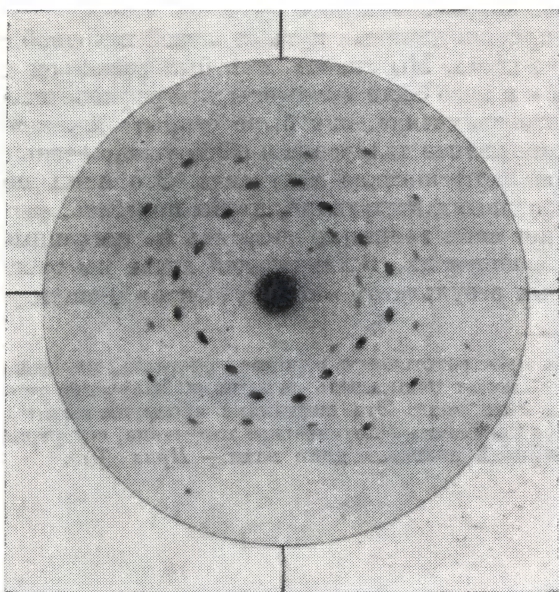


Фото XIII. Симметричная картина дифракции рентгеновских лучей на кристалле сульфида цинка.

Этим заканчивается история эксперимента, но дискуссии о природе новых лучей на этом не закончились. Были получены более убедительные данные в виде красивых симметричных снимков (фото XIII), связанных с симметрией кристалла. Однако их не удавалось как следует понять. Сторонники корпускулярной теории спрашивали, не могут ли наблюдаемые картины порождаться корпускулами, проникающими через «туннели» в структуре кристалла. Но в конечном счете одержали верх сторонники

волновой теории, когда выяснилось, что получающиеся рентгеновские лучи охватывают целый диапазон длин волн, подобно белому свету¹⁾. Теперь все удалось связать воедино, и дифракция рентгеновских лучей превосходно описывалась теорией пространственной дифракционной решетки, разработанной Лауэ. Оставалось лишь найти постоянную такой решетки, но с историей этого открытия придется повременить до следующей главы.

Мы прошли длинный путь от нашей исходной точки — видимого света. Мы видели, как был расширен диапазон спектра и в него были включены ультрафиолетовое и инфракрасное излучение, как было открыто длинноволновое электромагнитное излучение и обнаружено очень коротковолновое рентгеновское излучение. Это лишь несколько примеров, но их достаточно, чтобы показать, как физика расширяет свои границы, опираясь на сделанные открытия и развивая их. В следующей главе мы расскажем о некоторых результатах такого развития физики.

¹⁾ На пространственной решетке кристалла, как показала теория Лауэ, может испытывать дифракцию излучение только определенных длин волн. Эта дифракция обнаруживается на опыте, когда берется «белое» рентгеновское излучение, содержащее достаточно широкий диапазон длин волн.— *Прим. ред.*

10. Строение вещества

На предыдущих страницах я пытался изобразить впечатляющую картину развития физики. Отправляясь от самых обыденных наблюдений, физика вышла далеко за пределы повседневного опыта. Вместе с тем физика создавала инструменты, необходимые как для собственного прогресса, так и для блага всего человечества. Физика, чтобы ее предназначение было оправданным, всегда должна отражать в своем существе оба этих аспекта.

Сегодня мы многое знаем о строении вещества. Однако, чтобы получить эти знания, физики не ждали, пока в их распоряжении окажутся все необходимые инструменты. Физики — народ нетерпеливый, и они изобретают нужные им средства по мере надобности в них. Что касается газов, то еще Бойль и другие ученые выдвигали теории по поводу их природы, и к середине XVIII столетия кинетическая теория газов стала общепринятой. О самих молекулах не было известно ничего или не требовалось ничего знать, поскольку они почти все время находятся очень далеко друг от друга и не взаимодействуют друг с другом (стр. 53). Другое дело жидкости: в них молекулы всегда находятся близко друг к другу, поэтому свойства молекул здесь приобретают важное значение. Каким образом можно было бы приступить к их изучению?

Ответ на этот вопрос дает одно свойство, которым отличаются жидкости от газов: существование свободной поверхности. Одним из первых изучать это явление стал Гук. В своей книге «Микрография» (стр. 93) Гук рассказывал о сделанных им открытиях. Он установил, что заставить воду протекать через маленькие отверстия можно, только приложив давление, и что расплавленный свинец

образует шарообразные капли. Юнг в 1804 г. и Лаплас в 1806 г. дали объяснение этим явлениям, исходя из понятия о том, что мы теперь называем поверхностным натяжением. Внутри жидкости каждая молекула притягивается одинаково со всех сторон своими собратьями, но на поверхности, поскольку за ее пределами молекул жидкости нет, результирующая сила, действующая на каждую молекулу, должна быть направлена внутрь. Эта книга не ставит своей целью сколько-нибудь подробное обсуждение теории, и хотя поверхностное натяжение — общеизвестное явление, вывести его следствия из теории Юнга и Лапласа на самом деле не так легко. Может быть, правильнее сказать лишь, что их идеи привели к выводу о существовании поверхностной энергии жидкости и что, поскольку устойчивые системы стремятся обладать минимумом энергии, свободная поверхность стремится иметь как можно меньшую площадь.

Это представление объясняет образование сферических капель расплавленного свинца, которое обнаружил Гук, хотя большие капли принимают сплюсненную форму из-за действия силы тяжести. В 1873 г. Плато (1801—1883) предложил остроумный способ нейтрализовать влияние силы тяжести. Он показал, что смесь воды со спиртом той же плотности, что и оливковое масло, способна образовывать в этом масле большие взвешенные сферические капли. Современный вариант этого эксперимента иллюстрирует фото XIV.

Физики XIX столетия придумали множество изящных экспериментов, иллюстрирующих поверхностное натяжение, но многие современные ученые считают, что ему уделялось в курсах физики слишком большое внимание и что теперь это явление заслуживает лишь краткого упоминания. Я с этим не согласен. Поверхностное натяжение играет важную роль в обыденной жизни и в технике, и ни один физик не может считать свое образование полным, если он не умеет учитывать это явление в необходимых случаях. Но, помимо этого, поверхностное натяжение дает нам возможность впервые заглянуть в мир молекул. Правда, здесь речь идет лишь о беглом знакомстве, но зато тут можно обойтись без сложных приборов и теорий, сопутствующих позднейшему времени.

Это может показаться довольно удивительным, ибо многие считают, наверное, что объекты атомных размеров нельзя исследовать без прямого наблюдения одиночных атомных явлений. Посмотрим, так ли это. Предположим, что сила, направленная внутрь жидкости, действует только

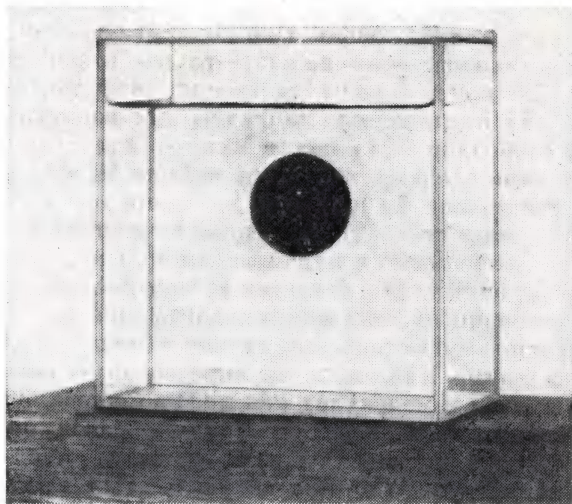


Фото XIV. Сферическая капля анилина, взвешенная в соляном растворе той же плотности.

на расстоянии b порядка размера молекулы; масса, связанная с площадью A слоя толщиной b , равна $Ab\rho$, где ρ — плотность. Для испарения этой массы требуется количество теплоты $lAb\rho$, где l — скрытая теплота испарения (стр. 38). Но это количество теплоты должно быть равно энергии, связанной с площадью A , т. е. σA , где σ — поверхностное натяжение. Таким образом,

$$\sigma A = lAb\rho,$$

или

$$b = \frac{\sigma}{l\rho}.$$

Можно сюда подставить значения постоянных для воды: $\sigma = 70$ дин/см и $l = 500$ кал/г, или $2 \cdot 10^{10}$ эрг/г.

Таким образом, поскольку $\rho = 1 \text{ г/см}^3$,

$$b \approx 3 \cdot 10^{-9} \text{ см.}$$

Полученная нами величина чрезмерно мала¹⁾, но это не удивительно, если учесть, что при оценке были сделаны грубые приближения.

Может быть, более важный аспект этого рассуждения заключается в следующем. Оно показывает, что поверхностное натяжение — это не какое-то необычное свойство жидкостей, а *совершенно нормальное* их свойство. Если бы не было сил притяжения, направленных вовнутрь, то не было бы свободной поверхности и скрытой теплоты испарения. Другими словами, жидкости не были бы жидкостями, и не существовало бы никакого различия между жидким и парообразным состояниями. Такое исчезновение различий между жидкостью и паром, в самом деле, имеет место при определенных, так называемых критических температурах и давлении, разных для каждой жидкости.

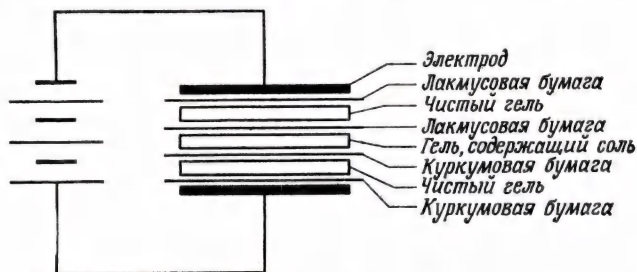
Признание существования атомов и молекул дало физике к середине XIX столетия определенную цель — узнать об атомах и молекулах как можно больше, опираясь на уже имеющиеся сведения. Каким образом молекулы связаны друг с другом? Обладают ли атомы какой-нибудь тонкой структурой? Сначала получить ответ на подобные вопросы, исходя из имеющихся знаний, казалось невозможным. Но постепенно с помощью человеческого воображения удалось добыть огромное количество информации, на получение которой не было никаких разумных оснований рассчитывать. Отчасти она была получена из наблюдений над обычными явлениями, а отчасти — в результате того, что были открыты ключи, запрятанные как раз на доступной для человека глубине (см. стр. 109). Одним таким ключом был электролиз (стр. 121). Фундаментальное значение электролиза для физики в наибольшей степени выявил Фарадей, который почти безошибочно чувствовал, что нужно исследовать.

Явление электролиза привлекло внимание Фарадея, поскольку он понимал, что здесь скрыт еще один ключ к

¹⁾ Примерно в 10 раз меньше среднего расстояния между молекулами воды в жидкости. — *Прим. ред.*

прогрессу физики. Электролиз можно было рассматривать довольно прозаически как новую отрасль химической физики, более примечательную своей практической ценностью, чем принципиальным значением. Но Фарадей увидел в электролизе еще один знак, указывающий на связь между двумя как будто бы не связанными явлениями — электричеством и химическим взаимодействием. Он знал, что здесь должно быть заключено нечто глубокое, и поставил перед собой задачу попытаться выяснить, что это такое.

Современники Фарадея выдвигали весьма курьезные теории электролиза, например вроде того, что вода —



Ф и г. 38. Электролитический элемент Фарадея, служивший для демонстрации того, что электрохимическое действие имеет место только у электродов.

это химический элемент, а кислород и водород — соединения воды соответственно с положительным и отрицательным электричеством. Ясность в этом вопросе начала появляться после Дэви (1778—1829). В 1806 г., например, он провел эксперимент с сульфатом калия в двух агатовых чашках; после пропускания тока в течение некоторого времени он обнаружил в одной чашке едкое кали, а в другой — серную кислоту. Что могло убедительнее доказывать способность электричества вмешиваться в химическую реакцию?

Однако рассуждения Дэви о природе этого явления оставляли неясными основные моменты, и главная их ценность была в том, что они стимулировали мысль Фарадея. Фарадей радикально видоизменил опыт Дэви, сделав его несравненно более прозрачным. Он изготовил одну электролитическую ячейку, как показано на фиг. 38. Химичес-

кое разложение обнаруживается по окрашиванию лакмусовой и куркумовой бумажек. Хотя гель, содержащий соль, не соприкасался с электродами, окрашивание наблюдалось только у электродов.

На основе этих результатов Фарадей пришел в 1833 г. к новой теории. Согласно этой теории, жидкости, поддающиеся электролизу, состоят из частиц двух сортов (теперь мы называем их ионами), которые испытывают действие со стороны всех своих соседей. Только у электродов частицы не окружены полностью другими частицами, и, следовательно, только здесь на частицы действуют неуравновешенные силы. Разве нельзя узнать в этом современную теорию структуры электролитов?

Теория Фарадея, подобно всем настоящим физическим теориям, подсказывала новые направления экспериментальных исследований. Во-первых, Фарадей показал, что количество диссоциирующих молекул зависит только от тока и не зависит от материала электродов. Он включил последовательно несколько электролитических элементов с электродами различных размеров и показал, что в каждом выделяется одно и то же количество газа. Точность особенно его не беспокоила — ни одна из работ Фарадея не отличалась высокой точностью измерений — и, когда в двух трубках было 1,9 и 2,2 кубического дюйма газа, он считал, что объемы равны. Однако некоторое количество газа улетучивалось вдоль токовых вводов; тогда Фарадей расположил проволоки в верхней части трубок, и результаты опытов улучшились.

Затем Фарадей приступил к многомесячной работе с различными соединениями с целью проверить закон, который, как он был уверен, *должен* выполняться, — закон о том, что выделившееся количество данного химического элемента должно быть пропорционально массе этого элемента в электролите. С газами он поступал, как описано в предыдущем абзаце, а твердые осадки определял взвешиванием электрода до и после электролиза. Например, в опыте с двумя пластинками из амальгмированного цинка в серной кислоте Фарадей получил 10,02 кубического дюйма водорода у одного электрода, в то время как на другом электроде имела место потеря 6,30 грана цинка. Введя поправку на температуру и давление, Фарадей

пришел к выводу, что получил эквивалент 1,878826 гра на воды. Таким образом, он приводит соотношение пропорциональности

$$1,878826:6,30 = 9:30,2.$$

(В наши дни Фарадею снизили бы оценку за то, что он взял слишком много значащих цифр.) Он считал значение 30,2 достаточно хорошо согласующимся с предполагаемым значением 32,5 — эквивалентным весом цинка.

Фарадей после консультаций с другими учеными ввел многие термины, которые для нас сегодня привычны: электролит, анион, катион и т. д. Он уделял очень большое внимание терминологии; ему нравилось новое слово «scientist» (ученый), которое тогда входило в моду, и совсем не нравилось слово «physicist» (физик) с его тремя свистящими звуками, следующими друг за другом.

К началу 1834 г. Фарадей основательно разработал основы теории электролиза и создал новую научную дисциплину — электрохимию. Но он прошел мимо одной чрезвычайно важной идеи. Законы Фарадея означают, что каждый атом несет либо один и тот же по величине заряд, либо простое кратное этого заряда и что, таким образом, электричество, как и вещество, имеет атомистическую природу. На это указал Гельмгольц (1821—1894) в лекции, посвященной памяти Фарадея, в 1881 г. Работы Фарадея, подобно всем действительно великим достижениям в области физики, открыли совершенно новые горизонты.

Однако дальнейшие успехи не были логическим продолжением предшествующих. Они явились результатом исследований в совершенно новом направлении — экспериментов с разрядной трубкой, которые привели в 1895 г. (стр. 146) к открытию рентгеновских лучей. В 1897 г. Дж. Дж. Томсон открыл электрон. Физика, да и вообще вся жизнь на Земле, теперь уже никогда не сможет быть такой, как до этого открытия. Ни одно из явлений, наблюдавшихся в опытах с разрядной трубкой, нельзя было объяснить в рамках физических представлений того времени, и, следовательно, эти представления нужно было либо расширить, либо видоизменить. Большинство физиков склонно было надеяться на то, что достаточно лишь расширения понятий, но более дальновидные, вероятно, поняли, что

потребуется изменения господствующих представлений — может быть, даже коренные, революционные изменения, — поскольку все наблюдавшиеся эффекты были слишком уж необычными.

Как ведется физическое исследование? Существуют в общем два подхода. В первом из них пробуют всё новые методы измерения и смотрят, не наводят ли полученные результаты на какую-нибудь новую идею. (Стоит вспомнить высказывание лорда Рэля, которое можно кратко выразить словами «физика — это измерение».) Во втором подходе пытаются выполнить эксперимент как можно проще, с тем чтобы извлечь из него хотя бы качественные сведения. В опытах с разрядной трубкой успех принес последний метод.

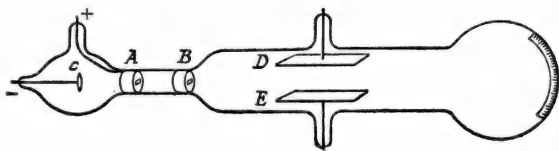
Когда давление уменьшалось до значений, при которых в трубке пропадали светящиеся полосы, можно было детально исследовать возникающее в трубке сплошное свечение, связанное с так называемыми катодными лучами. Во-первых, было найдено, что эти лучи легко отклоняются магнитным полем, в то время как заметно отклонить их электрическим полем не удавалось. При соударении катодных лучей с экраном выделялось тепло. Траектория этих лучей не зависела от расположения анода. Для испускания катодных лучей была необходима определенная напряженность поля, распространялись они прямолинейно и потому давали резкие тени.

Все эти факты оставались непонятными. Некоторые из них как будто говорили о том, что катодные лучи представляют собой корпускулы, а направление отклонения их в магнитном поле согласовывалось с предположением, что они несут отрицательный заряд. Но почему они не отклонялись в электрическом поле? Крукс (1832—1919) проделал опыт с целью выяснить, обладают ли катодные лучи импульсом, заставив их вращать легкую тщательно сбалансированную крыльчатку.

Спор Ньютона с Гюйгенсом, разгоревшийся в XVII столетии (стр. 72), вновь ожил: что такое катодные лучи — частицы или волны? Немецкие ученые, находившиеся под впечатлением блестящих открытий Герца (стр. 144), считали, что катодные лучи — это волны. Почему же в таком случае они отклоняются *магнитным полем*? Это новый

вид электромагнитного излучения, которое отклоняется магнитным полем, отвечали они.

Более трезво мыслящие англичане считали в общем, что катодные лучи — это заряженные частицы. Почему в таком случае они не отклоняются электрическим полем? Возможно, эксперименты были недостаточно хорошо поставлены, чтобы обнаружить эти отклонения. Именно в этом и убедился Томсон. Воздух при том давлении, при котором наблюдаются катодные лучи, — неплохой проводник, а мы знаем (стр. 116), что внутри проводника электрическое поле существовать не может. Поэтому в промежутке между электродами, где происходит разряд, идет ток, а электростатическое поле пренебрежимо мало.



Ф и г. 39. Прибор Томсона для измерения отношения e/m частиц катодных лучей.

Это привело Томсона к его первой действительно удачной мысли: уменьшить, насколько возможно, давление, чтобы катодные лучи были видны лишь слабо, а затем провести эксперимент по отклонению их в электрическом поле. Эксперимент удался: катодные лучи отклонялись в *электрическом поле*, причем направление их отклонения совпадало с тем, какое должно быть, если катодные лучи заряжены отрицательно.

Итак, как будто бы, наконец, были получены полные данные. Катодные лучи представляют собой отрицательно заряженные частицы, обладающие значительным импульсом. Теперь, когда так много удалось выяснить, можно было ввести в игру количественные методы. С измерений начинать не следует, ибо без понимания существа явления можно в результате измерений получить неверные величины либо же измерения окажутся настолько сложными, что не удастся разобраться в их результатах. Томсон, однако, знал, что делать. Он сконструировал прибор (фиг. 39),

в котором отклонение катодных лучей в электрическом поле компенсировалось отклонением их в магнитном поле. Успех этого эксперимента обусловлен тем, что сила, действующая на заряд в электрическом поле, не зависит от скорости заряда, а сила, с которой действует магнитное поле, *зависит* от скорости, поскольку заряд ведет себя как ток. Отклонения в электрическом и магнитном полях, разумеется, зависят от скорости, ибо чем быстрее частица движется, тем большая сила требуется, чтобы вызвать отклонение частицы на заданный угол (при этом скорости, отвечающие данному углу, неодинаковы для обоих полей).

С помощью своего прибора Томсон получил два поразительных результата. Прежде всего он нашел, что частицы обладают огромными скоростями, близкими к $1/10$ скорости света. Точное значение скорости было не вполне достоверным, ибо, как мы видели, электрическое поле нельзя здесь точно измерить. Однако не было никакого сомнения в том, что частицы двигались с гигантскими скоростями, которые не укладывались в обычные представления о скоростях материальных тел. Но, что еще более важно, заряд, приходящийся на единицу массы — теперь это отношение обозначают e/m и называют удельным зарядом электрона, — оказался порядка 10^7 электромагнитных единиц на грамм.

Мы уже говорили о том, насколько важно, когда ученый «ожидает» получить тот или иной результат (стр. 35). Томсон был слишком серьезным ученым, чтобы не понимать, что полученный им результат представлял собой нечто экстраординарное. Сто миллионов кулонов на грамм? Никакая другая форма материи не обладала скольконибудь близким по величине удельным зарядом. Ион водорода, образующийся в электролите, обладает зарядом 100 000 кулонов на грамм. Это чрезвычайно большая величина, если принять во внимание сказанное выше о силе взаимодействия между двумя зарядами по кулону каждый (стр. 114). А здесь мы имеем частицы, несущие еще в 1000 раз больший заряд. Ничего удивительного, что физики заговорили о «четвертом состоянии вещества», представлявшем собой, быть может, само электричество.

Томсон много думал о том, что означают полученные им результаты. Были ли это какие-то новые атомы, несущи-

щие огромный заряд, или новые частицы с массой, много меньшей массы любых атомов? Как ответить на этот вопрос? Для этого имелось достаточно данных, но нужен был ум Томсона, чтобы понять их значение.

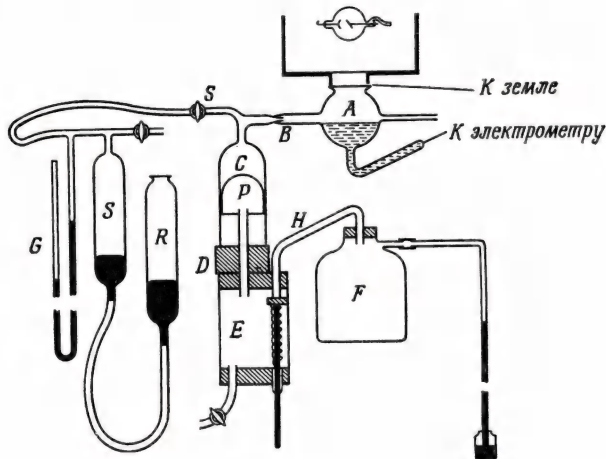
В 1893 г. Ленарду (1862—1947) удалось выпустить катодные лучи через очень тонкое алюминиевое окошко в воздух, где они создавали красивое свечение на расстоянии нескольких миллиметров. Какое это имело отношение к рассматриваемой проблеме? Томсон знал, что средний свободный пробег (среднее расстояние, проходимое между последовательными столкновениями (стр. 55)) молекул воздуха при атмосферном давлении близок к 10^{-5} см. Если катодные лучи могли проходить в 10 000 раз больший путь, то средний свободный пробег частиц в воздухе должен был быть много больше, и, значит, частицы должны быть чрезвычайно малы. Поэтому Томсон в 1897 г. высказал мнение, что катодные лучи представляют собой поток весьма малых частиц, движущихся со скоростями, близкими к скорости света, которые несут такой же заряд, как ионы Фарадея, но обладают массой, в 1000 раз меньшей массы самого легкого атома. В самом деле, новая форма материи!

Сколько существует типов этих частиц? Опыты с различными газами дали одно и то же значение удельного заряда. Похоже было, что открытая Томсоном частица — Стони назвал ее «электроном» — представляет собой универсальный компонент вещества. Следует особо подчеркнуть важное значение отношения e/m : именно по величине этого отношения удалось «опознать» электроны в измерениях, проведенных в самых разных условиях; удалось показать, что и другие частицы тоже обладают характерным для них значением этого отношения.

Со значением e/m для электрона было все в порядке, но чтобы полностью «определить» электрон, нужно было узнать e и m в отдельности. Это значительно более сложная задача, поскольку она связана с точными измерениями в области атомных размеров (стр. 157). Замечательный вклад в ее решение внес Милликен (1868—1953), проделавший известный всем эксперимент. Работа Милликена — но это уже не столь широко известно — явилась завершением целой серии экспериментов, проводившихся

Ч. Т. Р. Вильсоном (1869—1959), Таунсендом (1868—1957) и Дж. Дж. Томсоном.

Отправной точкой для этой работы послужил интерес Вильсона к образованию облаков. Он знал, что облака, состоящие из мириадов капелек, не могут образоваться без частиц, на которых конденсируются капельки. Не могли ли открытые недавно ионы действовать в качестве таких частиц? Вильсон изобрел расширительную камеру (фиг. 40),



Ф и г. 40. Прибор для конденсации водяных капелек на заряженных частицах, позволяющий определять заряд отдельных капелек.

в которой можно было создавать внезапное адиабатическое охлаждение (стр. 61) и тем самым получать пересыщенный пар, и применил этот прибор для изучения ионизации, вызываемой рентгеновскими лучами. Он нашел, что туман, образующийся в пространстве, занятом паром, отличается поразительной однородностью, откуда следовал вывод об одинаковом размере всех ионизированных частиц.

Таунсенд и Томсон применили эту идею к изучению электрона. Если бы удалось измерить полный заряд и массу всех капелек и найти размер каждой капельки, то можно было бы определить заряд отдельной капельки. При этом

следовало предполагать, что каждая заряженная капелька несет один электрон и нет незаряженных капелек; в свете таких предположений трудно было рассчитывать на большую точность опыта. Однако первые опыты очень часто весьма неточны: нельзя надеяться сразу достигнуть совершенства.

Чтобы определить размер капелек, ученые пытались измерить дифракционные кольца, наблюдаемые в монохроматическом свете, но результаты были слишком неточны. Тогда у них возникла идея использовать скорость падения капельки, применив формулу Стокса (1819—1903), которая связывает предельную скорость движения шара в некоторой среде с его радиусом и вязкостью среды. Применение этой формулы к таким малым тельцам было еще одним смелым шагом.

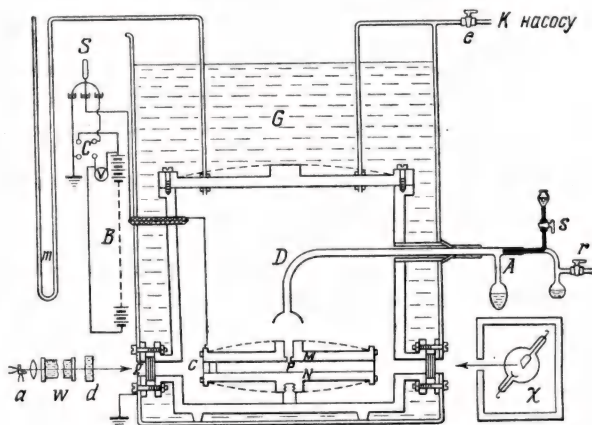
Таунсенд нашел в своем эксперименте, что капельки обычно имели радиус $3 \cdot 10^{-4}$ см и что всего их в тумане было около $3 \cdot 10^4$. С помощью электрометра Таунсенд определил полный заряд, оказавшийся равным $3 \cdot 10^{-15}$ Кл, так что заряд отдельной капли был близок к 10^{-19} Кл. Это исключительно хороший результат — примерно две трети верного значения. Он свидетельствовал о том, что гипотеза Томсона была правильна и что масса электрона близка к $1/1000$ массы самого легкого атома — атома водорода.

Именно опираясь на результаты этой работы, Милликен решил осуществить свой еще более смелый план — измерить заряд отдельных капелек. Только таким образом, считал он, можно обойтись без грубых допущений, которые приходится делать при измерениях большого числа капелек. Но сперва нужно было оценить технические трудности.

Какого рода силу ему предстояло измерить? Сила, действующая на заряд 10^{-19} Кл в поле 10^4 В/см — самом большом поле, при котором еще не наступает электрический пробой воздуха, — составляет всего 10^{-8} дин. Сила эта до смешного мала. Но ведь она должна быть приложена к капелькам, которые тоже до смешного малы, с массой порядка 10^{-12} г. Очевидно, движение капельки в результате приложения этой силы можно легко наблюдать. Такие вычисления по порядку величины (стр. 19)

обычно должны предшествовать планированию нового эксперимента.

Милликен воспользовался прибором, показанным на фиг. 41. Между двумя пластинами диаметром 22 см, разделенными оптически гладкими брусочками строго одинаковой толщины (приблизительно 1,5 см), создавалось поле напряженности порядка 5000 В/см. В это поле впрыскивались капельки масла с низкой упругостью паров;



Ф и г. 41. Прибор Милликена для определения заряда на одиночной заряженной капельке.

масса капелек, таким образом, во время опыта не менялась вследствие испарения. Милликен наблюдал движение капелек при помощи микроскопа с двумя горизонтальными окулярными нитями; отмечалось время свободного падения одной капельки и затем время подъема капельки после включения поля. Милликен приобрел исключительную ловкость в обращении со своим прибором. Он утверждал, что может удерживать какую-нибудь одну капельку в поле зрения в течение пяти или шести часов — замечательный пример терпения и выдержки!

Милликен обнаружил замечательное постоянство времени падения выбранной капли, откуда следовало, что масса капли не менялась со временем. Вместе с тем пере-

мещение капли вверх занимало разное время в зависимости от количества случайно приобретенного заряда; вот типичная серия отсчетов: 12,5; 12,4; 21,8; 34,8; 84,5; 85,5; 34,6; 34,8; 16,0; 34,8; 34,6; 21,9 с. Какой вывод можно сделать из этих данных?

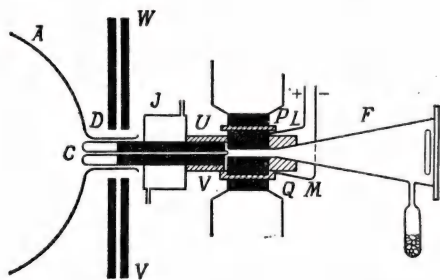
Времена движения капли вверх распределились по пяти группам: 12,45; 16,0; 21,85; 34,72 (наиболее часто встречающееся значение) и 85,0 с. Если предположить, что в соответствии с формулой Стокса скорость движения шара в среде является мерой действующей на него силы, то надо взять величины, обратные этим значениям. Они равны: 0,0803; 0,0625; 0,0458; 0,0288 и 0,0118 с⁻¹. Эти обратные величины, разумеется, ничего не означают в абсолютном смысле, но их *разности* должны характеризовать приобретение или потерю одной или более единиц заряда. Разности эти равны: 0,0178; 0,0167; 0,0170 и 0,0170 с⁻¹ — явное свидетельство атомистической природы электрического заряда.

Милликен утверждал, что, проделав больше тысячи опытов, он никогда не получал разностей, выпадающих из такого набора. Это удивительно: представляется невероятным, чтобы за промежуток времени порядка минуты не произошло каких-нибудь изменений. Может быть, его капли знали, что за ними наблюдают! Или, возможно, Милликен стал настолько искусным, что научился обнаруживать нарушение постоянства условий опыта и отбрасывал соответствующий результат?

Милликен долго совершенствовал свой прибор и в конечном счете пришел к выводу, что заряд электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Теперь можно было найти все остальные атомные единицы, в частности число Авогадро (стр. 54), которое оказалось равным $6,06 \cdot 10^{23}$ молекул в грамм-молекуле. Масса электрона отсюда оказалась равной $9,1 \cdot 10^{-28}$ г.

Итак, мы окончательно «выследили» электрон. Ну а как обстоит дело с теми частями атомов, которые остаются после отделения электронов? Есть у них что-нибудь нам рассказать? Они, разумеется, должны двигаться в противоположном направлении по отношению к электрону в разрядной трубке, но так как они гораздо больше, то совершают при движении больше соударений, чем электроны,

и, следовательно, не набирают такой энергии, как электроны, и не вызывают таких же видимых эффектов. В 1886 г. Гольдштейн (1850—1931) нашел, что эффекты, вызываемые остающимися после отделения электронов частями атомов, можно наблюдать, если просверлить каналы в катоде разрядной трубки: наблюдались слабые потоки в той части трубки, которая *противолежит* аноду. Хотя было ясно, что они должны быть положительно заряжены, они, казалось, не отклонялись магнитным полем, пока



Ф и г. 42. Прибор для определения скорости и отношения e/m положительных частиц.

Вину (1866—1938) не удалось в 1898 г. получить достаточно сильное поле, которое давало наблюдаемое отклонение.

Что касается результатов измерений отношения e/m , то они были отнюдь не столь очевидны, как в случае катодных лучей; эти результаты указывали только, что для водорода отношение e/m было такого же порядка, как полученное при электролизе (стр. 161). Но в опытах с другими газами измерения дали непрерывно изменяющиеся значения, и Томсон решил, что это вызывается столкновениями, ведущими к дальнейшей ионизации, так что частицы могли приобретать и терять заряд непрерывным образом. Исходя из этого предположения, он придумал в 1913 г. прибор, показанный на фиг. 42. В этом приборе электрическое и магнитное поля были параллельными друг другу и отклоняли частицы под прямыми углами.

Давление поддерживалось как можно более низким. Томсон эмпирически нашел ряд способов облегчить возникновение разряда; например, он наносил на катод слой кальция.

Экспериментируя со своим новым прибором, Томсон получил результаты огромной важности. Можно показать, что частицы с определенным значением e/m будут давать на экране параболический след, причем протяженность каждого следа — отрезка параболы — характеризует диапазон значений скорости частиц. В случае водорода Томсон обнаружил только два следа, он приписал их однократно заряженным атомам и однократно заряженным молекулам. Это было первым свидетельством того, что водород на самом деле представляет собой «элементарный» элемент; раньше водород приходилось ставить на первое место потому, что не было известно никаких более легких атомов. Если бы вообще был какой-нибудь признак того, что атомы водорода могут терять два отрицательных заряда, то всегда оставалась бы возможность обнаружить еще более легкий атом с одним зарядом. Но на самом деле однократно заряженному атому водорода нельзя было сообщить дополнительный заряд, и, следовательно, он должен был представлять собой элементарный «кирпичик». Однократно заряженный атом водорода получил название протона. Зато в экспериментах с гелием были обнаружены двукратно заряженные атомы, и, таким образом, гелий можно было поместить в ряд вслед за водородом.

Неожиданный результат был получен при изучении неона, элемента с атомным весом чуть больше 20: эксперименты дали два следа, соответствующие массам 20 и 22. Томсон и его коллега Астон (1877—1945) были в недоумении. Может быть, большая масса соответствовала соединению NeH_2 ? Или это был еще один элемент? Каким бы ни было это вещество, оно должно, казалось, обладать физическими свойствами, совершенно отличными от свойств неона, поэтому Астон пытался отделить его путем ожижения. Однако полученный газ по-прежнему давал тот же самый результат. Ученые были вынуждены заключить, что атомы неона встречаются двух сортов: с массами 20 и 22.

Значит, атомы элементов не все одинаковы, как думал Дальтон (стр. 30). Атомы, различающиеся только массой, называются изотопами. Мы говорили, что обычный неон состоит из двух изотопов с массами 20 и 22; процентные содержания первого и второго находятся в отношении 9 : 1. Таким образом, получило объяснение дробное значение атомного веса неона 20,2. Точно так же обстояло дело и с другими атомами, такими, как хлор с атомным весом 35,5. Теперь все стало на свое место. Итак, удалось разгадать еще один каприз природы.

Подробному рассказу об этой работе Астона и о результатах точных измерений атомных весов изотопов на его масс-спектрографе мы не можем уделить здесь места. Эти результаты полностью подтвердили выводы Томсона, но они же поставили новые вопросы. Чем отличаются друг от друга изотопы того или иного элемента и почему их химические свойства одинаковы? Ответы на эти вопросы могут быть даны только после рассмотрения явлений радиоактивности, которая составляет тему следующей главы.

Эти замечательные открытия не должны ослеплять нас. Отыскание путей изучения внутриатомного мира позволяет нам воздать самую высокую похвалу силе ума человека и его изобретательности. Но тем не менее оставалось много неясного. Каким образом атомы соединяются друг с другом, образуя различные виды вещества, которые мы знаем в обыденной жизни? Существует ли какая-нибудь надежда увидеть, как располагаются атомы, скажем, в куске металла или в простых химических веществах вроде поваренной соли?

Если под словом «увидеть» мы понимаем наблюдение в видимом свете, то ответ гласит: нет. Дело в том, что видимый свет имеет длину волны, в 10 000 раз большую, чем нужно, чтобы получить изображения атомов. Следовательно, нам придется подыскать излучение с меньшей длиной волны и посмотреть, что мы можем с его помощью сделать. Может быть, годятся рентгеновские лучи? Мы знаем (стр. 145), что они имеют подходящую длину волны, но как их применить, совсем не очевидно. Рентгеновские лучи не преломляются (стр. 147), поэтому они не могут давать изображения, как лучи видимого света, при пос-

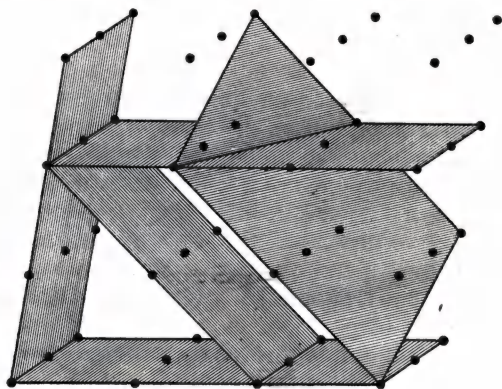
редстве линз. Есть ли какой-нибудь способ обойти эту трудность?

Посмотрим на поставленную задачу по-другому. Теория Аббе говорит, что изображение объекта создается благодаря взаимной интерференции рассеянных им волн. Мы, несомненно, можем наблюдать рассеянное рентгеновское излучение (стр. 149). Но что можно узнать из этих наблюдений? Лауэ безуспешно пытался решить эту задачу, рассматривая дифракцию на пространственной решетке. Не зная ни состава излучения, с которым он работал, ни расположения атомов в кристаллах, Лауэ не мог в полной мере интерпретировать наблюдавшиеся им дифракционные картины. Успеха добился У. Л. Брэгг (родился в 1890 г.), прибегнув к значительно менее сложному методу исследования. Брэгг сам проделал несколько опытов по дифракции рентгеновских лучей и, анализируя *форму* пятен при различных расстояниях пленки от кристалла, пришел к убеждению, что в этих опытах происходит нечто вроде отражения. Но рентгеновские лучи не могут отражаться обычным образом (стр. 148). И вот Брэггу пришла в голову исключительно плодотворная мысль. Не может ли кристалл вести себя так, как если бы он содержал набор плоскостей, следующих друг за другом через определенные интервалы? Каждая плоскость могла бы рассеивать небольшое количество излучения, но суммарное рассеяние от большого числа плоскостей могло бы быть достаточно большим. Однако это могло быть так только в том случае, если волны, исходящие от всех плоскостей, усиливают друг друга. Брэгг исследовал возможность такого взаимного усиления волн. Он нашел, что необходимое условие состоит в том, чтобы волны отражались только под вполне определенными углами, которые даются уравнением

$$n\lambda = 2d \sin \theta.$$

В этом уравнении, известном как уравнение Брэгга, n — целое число; λ — длина волны излучения; d — расстояние между следующими друг за другом плоскостями, а θ — угол падения и «отражения». Значения θ , при которых имеет место отражение волн, известны под названием углов Брэгга.

Но что такое эти плоскости? Легко понять, что это плоскости, мысленно проведенные в различных направлениях в решетке кристалла. В простых кристаллах они могут проходить через центры атомов (фиг. 43), но в общем случае это не так. Интенсивность «отражений», как их продолжают называть, хотя в действительности они представляют собой порядки дифракции, должна нести какую-то



Ф и г. 43. Атомные плоскости в кристалле.

Показан простой кристалл, у которого в каждом узле пространственной решетки находится один атом. Изображены плоскости различной ориентации, содержащие эти атомы.

информацию о положении атомов в кристалле. У. Л. Брэгг и его отец У. Г. Брэгг (1862—1942) решили использовать эту мысль, построив прибор, который они назвали ионизационным спектрометром (фото XV). Прибор был устроен подобно обычному спектрометру (стр. 99). Коллиматор в нем заменяла пара узких щелей, кристалл укреплялся на поворотном столике и отраженные рентгеновские лучи регистрировались ионизационной камерой, измерявшей производимую ими ионизацию.

С помощью этого прибора Брэгги решили первую задачу Лауэ: они установили, что рентгеновские лучи от их трубки содержат сплошной фон, называемый «белым» излучением, и несколько узких спектральных линий, характерных для используемого анода. (О существовании

этого излучения заключил Баркла из опытов по рассеянию, о нем будет говориться дальше в гл. 12.) Эти сведения составили необходимую основу для дальнейшей работы Брэггов.

Брэгги сначала сосредоточили внимание на изучении простых кристаллов с кубической симметрией и выбрали

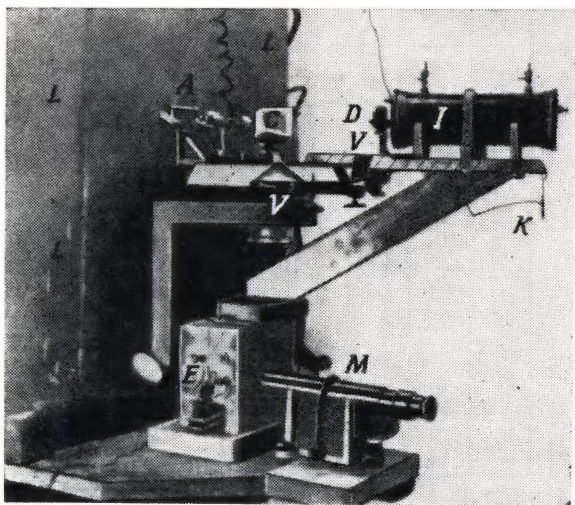
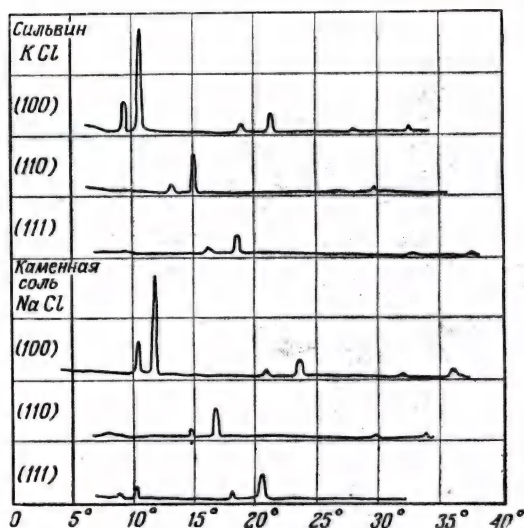


Фото XV. Ионизационный спектрометр.

поваренную соль NaCl и изоморфную ей соль KCl . Результаты, которые они получили, представлены на фиг. 44. Мы не имеем возможности рассматривать здесь все выводы из этих результатов, но, как видно, почти сразу они дают следующую информацию. Во-первых, эти результаты свидетельствуют о существовании двух спектральных линий; интенсивная линия называется K_α , более слабая — K_β . Во-вторых, они подтверждают закон Брэгга для каждого выбранного набора плоскостей, например в случае KCl для плоскостей, обозначаемых (100) (один, нуль, нуль). В-третьих, они показывают, что расстояния между плоскостями, принадлежащими к трем наборам: (100), (110) и (111)

для обоих кристаллов находятся в отношении $1 : 1/\sqrt{2} : 2/\sqrt{3}$ в соответствии с их кубической симметрией.

Некоторая трудность возникла из-за отсутствия отражения первого порядка от плоскостей (111) кристалла KCl, но это удалось легко объяснить тем, что K и Cl со-

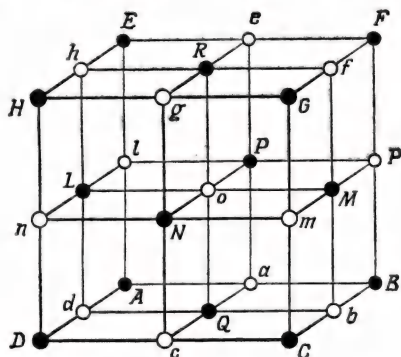


Фиг. 44. Результаты, полученные в опытах с хлористым натрием и хлористым калием с помощью понижающего спектрометра.

держат почти одинаковое число электронов ¹⁾. Результаты, о которых только что шла речь, соответствуют расположению атомов, показанному на фиг. 45. Это была первая кристаллическая структура, расшифрованная У. Л. Брэггом в 1913 г.

¹⁾ В направлении (111) (телесная диагональ кубической ячейки) волны, отраженные атомами K и Cl, сдвинуты по фазе на 180° друг относительно друга, и в результате интерференции интенсивности их вычитаются. Так как интенсивность отражаемых волн примерно пропорциональна числу атомных электронов, а у K и Cl эти числа близки (19 и 17), то наблюдается почти полное гашение интенсивности отраженного излучения в этом направлении.— *Прим. ред.*

Пожалуй, не будет преувеличением сказать, что это было одним из важнейших научных результатов, ибо он открыл новые перспективы почти перед всеми областями естествознания. Для химиков это означало новый подход к уяснению поведения атомов: так, в случае NaCl атомы не образуют молекул (многим химикам оказалось трудно усвоить этот результат), а действуют как ионы. Минералы



Ф и г. 45. Первая расшифрованная кристаллическая структура: каменная соль — хлористый натрий.

Черные кружки изображают хлор, белые — натрий.

можно было классифицировать в соответствии с расположением атомов. Химические элементы обнаруживали изумительно красивые, замечательные по своей простоте структуры. Вся современная физика твердого тела основана на сведениях, полученных из наблюдения дифракции рентгеновских лучей. Теперь наступила очередь биологии: через 50 лет после того, как была проделана работа Брэгга, удалось выяснить структуру таких соединений, как гемоглобин, отличающихся чрезвычайной сложностью по сравнению с поваренной солью.

Но что именно сделал Брэгг? Как он обошел трудности, вытекающие из теории Аббе? Брэгг просто выдвинул гипотезу о некотором расположении атомов и нашел путем вычислений, что оно дает такую же дифракционную картину, как та, которую удается наблюдать. Этот метод

«проб и ошибок» успешно применялся в течение многих лет, но теперь мы можем пойти гораздо дальше: мы в состоянии получить путем расчета фактические картины расположения атомов. Они точнее, чем были бы оптические изображения, поскольку используется более широкий диапазон рассеянного излучения и, кроме того, эти картины могут быть пространственными. Но в принципе эти картины равноценны изображениям, получаемым с помощью микроскопа, и можно сказать, что Брэгги создали новую область физики — рентгеновскую микроскопию. С ее помощью удалось успешно заполнить разрыв между представлением об индивидуальных атомах и нашими обычными представлениями о веществе.

11. Строение атомов

Эта глава представляет собой продолжение предыдущей. Вещество состоит из атомов, следовательно, свойства вещества зависят от свойств атомов. Как мы видели, к концу XIX столетия набралось много доказательств того, что атомы имеют более или менее сложное строение. К ним относятся результаты исследования электролиза, открытие электрона, наличие химического сродства — все они имели под собой какую-то глубокую основу. Какой длинный путь прошли мы от первой атомной теории Дальтона (стр. 29), в которой предполагалось, что атомы представляют собой элементарные кирпичики и что мир состоит из определенного числа атомов различных сортов с характерными свойствами, вечными и неизменными!

Эти представления особенно изменились после открытия электрона. Все атомы должны содержать электроны. Но как электроны в них расположены? Физики могли лишь философствовать, исходя из своих познаний в области классической физики, и постепенно все точки зрения сошлись на одной модели, предложенной Дж. Дж. Томсоном (1856—1940). Согласно этой модели, атом состоит из положительно заряженного вещества, внутрь которого вкраплены электроны (возможно, они находятся в интенсивном движении), так что атом напоминает пудинг с изюмом. Томсоновскую модель атома нельзя было непосредственно проверить, но в ее пользу свидетельствовали всевозможные аналогии.

К аналогиям нужно всегда относиться с опаской, хотя при умелом пользовании они могут оказаться весьма ценными. Во всяком случае, аналогии никогда не могут служить доказательством. Трудность заключалась в том, чтобы найти прямой подход к исследованию атомов. Как уже

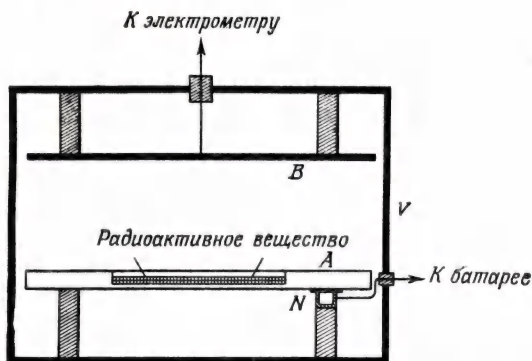
много раз бывало, такой подход появился не в результате целенаправленных поисков, а благодаря случайному наблюдению явления совсем иного рода. Это было открытие радиоактивности, сделанное А. Беккерелем (1852—1908). Отец Беккереля открыл ультрафиолетовый спектр (стр. 136), дед его тоже был известным физиком (стр. 196), так что физика, можно сказать, была у династии Беккерелей в крови. Замечательные исследования Беккереля были проведены в 1896 г., через год после открытия рентгеновских лучей и за год до открытия электрона. Эти три знаменательных события изменили всю физику!

Беккерель, видимо, был занят поисками какого-то излучения, исходившего от двойной сульфатной калий-урановой соли. Фотографические пластинки, которые находились в том же ящике, что и соль, оказались несколько засвеченными, и Беккерель хотел узнать причину этого. Стоит отметить, что указанное явление наблюдали и другие и держали пластинки подальше от этой соли. Беккерель подумал, что, возможно, в результате действия солнечного света вещество испускало излучение типа рентгеновских лучей. Он завернул фотопластинку в черную бумагу и выставил на солнечный свет, положив сверху кусочек соли. Пластика, надежно защищенная от света, после проявления обнаружила почернение. Эффект оказался воспроизводимым — каждый раз наблюдалось то же самое. Но затем Беккерель обнаружил, что такой же эффект наблюдается и в отсутствие солнечного света, и даже тогда, когда эксперимент проводился в темноте. Он понял, что открыл новое явление, и назвал его «радиоактивностью».

Беккерель тщательно исследовал открытое им явление. Он показал, что все соединения урана радиоактивны, причем активность примерно пропорциональна количеству содержащегося в них урана. Радиоактивность не зависела от температуры в диапазоне от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура жидкого воздуха) до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Под влиянием радиоактивности происходила разрядка электроскопа; другими словами, она была способна производить ионизацию точно так же, как рентгеновские лучи. Что же она собой представляла?

Теперь необходимо рассказать еще об одном событии, которое вызвало сильнейшее возбуждение физиков, хотя

по существу являлось лишь продолжением работы Беккереля. Это было открытие радия Пьером и Мари Кюри в 1898 г. Радий не так уж сильно отличается от урана, но его радиоактивность примерно в миллион раз сильнее. Без открытия радия большая часть последующих работ была бы невозможна, и мы, может быть, по сей день еще продолжали бы поиски объяснения радиоактивности. История этого открытия сама по себе заслуживает того, чтобы о ней рассказать.



Ф и г. 46. Схема прибора, использовавшегося супругами Кюри для измерения радиоактивности.

Пьер Кюри (1859—1906) к тому времени уже был выдающимся ученым, внесшим большой вклад в ряд областей физики. С его именем связан термин «точка Кюри», обозначающий температуру, при которой ферромагнитный материал перестает быть ферромагнитным. Его жена Мари Кюри (1867—1934) пробудила у него интерес к новому открытию, и супруги Кюри решили измерить сравнительную радиоактивность соединений урана, полученных из разных источников.

Прибор, которым пользовались супруги Кюри, показан схематически на фиг. 46. Он состоял из двух металлических дисков диаметром 8 см каждый, отстоящих друг от друга на 3 см, между которыми прикладывалось напряжение около 600 В. Излучавшее вещество наносилось равномерным слоем на нижнюю пластину. В цепь вклю-

чался чувствительный гальванометр, который спустя некоторое время показывал ток насыщения порядка 10^{-11} А.

Металлический уран вызывал ток $2,3 \cdot 10^{-11}$ А. Но урановая смолка, полученная из Иохимсталля, давала почти вчетверо больший ток — $8,3 \cdot 10^{-11}$ А. Пьер и Мари Кюри могли бы зафиксировать этот результат и не возвращаться больше к нему: в конце концов он не был даже на порядок больше. Тем не менее их это заинтриговало, и они попытались выяснить, обладает ли высокой радиоактивностью то же химическое соединение, но полученное искусственно. Оно дало ток всего $0,9 \cdot 10^{-11}$ А. Природное вещество действительно оказалось на порядок более активным.

Супруги Кюри предположили, что в смолке присутствуют следы какого-то *значительно более радиоактивного* вещества. Они занялись его химическим разделением, испытывая различные фракции на радиоактивность. И вот одна фракция, выделенная методами, сходными с методами выделения бария, дала излучение, которое непрерывно усиливалось по мере того, как выделение шло к концу. В конце концов была получена такая интенсивность, которая не оставляла у исследователей никаких сомнений в том, что они открыли новый и притом чрезвычайно мощный источник радиоактивности. Химический анализ этого источника путем наблюдения его оптического спектра (стр. 87) обнаружил три слабые линии бария и значительно более интенсивные линии неизвестного химического элемента. Супруги Кюри назвали его радием. Они сумели приготовить образцы, в миллион раз более радиоактивные, чем уран.

Работа супругов Кюри была крайне тяжелой. Весьма сложный химический анализ приходилось выполнять в трудных условиях, без хорошо оборудованной лаборатории, без сколько-нибудь значительных средств. Пьер и Мари Кюри были благодарны уже за бесплатные образцы урановой смолки, предоставленные им. И тем не менее, почувствовав, что получается нечто значительное, они, не задумываясь, вложили в эту работу всю свою энергию.

Соли чистого радия обладали изумительными свойствами. Сотые доли грамма этой соли вызывали вспышки на экране из сернистого цинка на расстоянии нескольких сантиметров, причем этот эффект наблюдался даже тогда,

если между источником радиоактивности и экраном помещали довольно толстый слой свинца. Весь цивилизованный мир был поражен открытием Кюри.

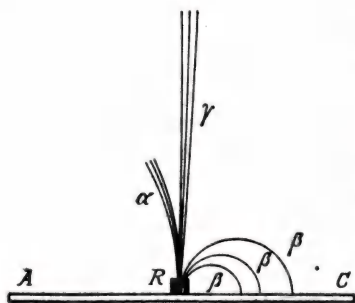
Умами физиков завладело новое явление, его изучением занялись во многих лабораториях. Но одно имя стоит особняком — имя Резерфорда (1871—1937). Будучи молодым человеком, он больше интересовался прикладной физикой и хотел добиться успеха, используя недавнее открытие электромагнитных волн (стр. 142) для связи. Возможно, это удалось бы Резерфорду, ибо у него был подходящий склад ума. Но его привлекла радиоактивность, и, приняв решение, он занялся ее изучением и работал над этой темой до последних дней своей жизни.

Резерфорд обладал важнейшим качеством великого ученого: он интуитивно чувствовал, в каких направлениях нужно предпринимать исследования. Когда все ново, легко «погрязнуть» в изучении всевозможных малозначительных деталей, ибо заранее неизвестно, что они несущественны. У Резерфорда было много общего с Фарадеем: оба были главным образом экспериментаторами. И хотя Резерфорд, будучи еще студентом, очень хорошо усвоил математику, он мало ею пользовался в последующем. Лишь некоторые из его работ содержали математические преобразования, и то это была в основном элементарная математика. Отличало Фарадея и Резерфорда то, что первый поднялся на вершину, возвышавшуюся почти над всей физикой (и большой частью химии), в то время как последний углубился в изучение одной области физики. Возможно, Фарадей тоже стал бы специалистом в какой-нибудь одной области, если бы жил столетием позже.

Резерфорд поставил перед собой задачу выяснить природу излучения, испускаемого радиоактивными веществами. Представляет ли оно собой некую простую сущность, как рентгеновские лучи, или же оно — смесь излучений? Фотографическое действие, флуоресценция и ионизация не позволяли провести различие между волнами и частицами, поэтому Резерфорд решил прибегнуть к двум основным методам — к измерению отклонения в магнитном поле и измерению поглощения.

Результаты исследований иллюстрирует схема, показанная на фиг. 47, — одна из самых известных в физике,

которая вместе с тем больше, чем какая-либо другая, создает неточное представление о фактическом положении вещей. Эта схема была впервые приведена Мари Кюри в ее диссертации (1903 г.) и с тех пор воспроизводится почти во всех учебниках физики. На ней показаны траектории трех видов излучения — α , β и γ — в магнитном поле,



Фиг. 47. Отклонение α -, β - и γ -лучей в магнитном поле, направленном перпендикулярно к плоскости рисунка.

Отклонение α -лучей сильно преувеличено.

перпендикулярном к плоскости рисунка и направленном от наблюдателя. Но схема эта чисто иллюстративная: отклонение β -лучей определить очень легко, зарегистрировать же отклонение α -лучей чрезвычайно трудно, и, как мы увидим, требуются весьма тонкие методы, чтобы вообще его обнаружить. Приведенную на фиг. 47 схему следует всегда сопровождать, как это делает Резерфорд в своей книге «Радиоактивность», указанием на то, что отклонение α -лучей сильно преувеличено.

Вследствие того что β -лучи легко отклоняются магнит-

ным полем, они были исследованы первыми. Резерфорд пришел к выводу, что β -лучи вели себя в соответствующих экспериментах точно так же, как катодные лучи, и, следовательно, по всей вероятности, представляли собой потоки электронов. В 1900 г. Беккерель установил фотографическими методами, что отношение e/m (стр. 165) для β -лучей примерно такое же, как для электронов, но скорости их были порядка половины скорости света. Резерфорд понимал, что такие скорости едва ли могли быть созданы мгновенно, и решил, что электроны в атоме должны находиться в состоянии интенсивного движения, каким-то образом случайно вырываясь из атомов.

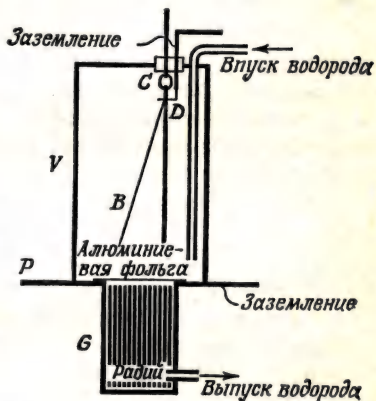
Следующим шагом было исследовать остальную часть излучения после «отсева» β -лучей. Испытывала ли эта часть излучения отклонение в магнитном поле? Резерфорд решил реализовать в своих исследованиях предельный случай —

использовать очень тонкие пучки, полученные с помощью узких щелей. Здесь как раз решающую роль сыграл радий. Излучение, испускаемое, например, ураном, было бы слишком слабым для обнаружения при таком ограничении ширины пучка. Однако в опытах с радием существовала другая опасность: радий выделяет газ, называемый радон, или эманацией радия, который сам радиоактивен, поэтому важно было, чтобы этот газ не попадал в прибор.

Лучи, оставшиеся после отклонения β -лучей, производили сильную ионизацию в воздухе. Резерфорд нашел, что они производят в 100 раз большую ионизацию, чем β -лучи, и в 1903 г., используя это обстоятельство, измерил их отклонение в магнитном поле. Прибор Резерфорда показан на фиг. 48. Чтобы получить как можно большую интенсивность, использовался ряд параллельных латунных

пластин, игравших роль коллиматоров. Расположенная сверху пластин алюминиевая фольга была такой толщины, что пропускала большую часть лучей, препятствуя в то же время прохождению эманации радия. При отсутствии магнитного поля скорость разряда электроскопа равнялась 8,33 В/мин, а после приложения магнитного поля напряженностью приблизительно 8000 Гс скорость разряда падала до 1,72 В/мин. Таким образом, исследуемые лучи отклонялись магнитным полем. Изменив форму щелей — это было достаточно легко сделать, — можно было определить направление отклонения. Оно оказалось противоположным направлению отклонения β -лучей, откуда следовало, что α -лучи заряжены положительно.

Итак, было найдено два сорта лучей. Существовали ли какие-нибудь еще? Излучение, идущее из радия, про-



Ф и г. 48. Схема прибора Резерфорда для обнаружения отклонения α -частиц.

пускали через достаточно толстый слой вещества, чтобы он полностью поглощал α - и β -лучи, но даже в этом случае наблюдалась небольшая ионизация — примерно 10^{-4} ионизации, производимой α -лучами. В 1900 г. Виллард установил, что эта слабая ионизация вызывается еще одной компонентой излучения, названной γ -лучами. Виллард использовал для регистрации γ -лучей фотографический метод и показал, что они являются еще более проникающими, чем самые жесткие рентгеновские лучи, известные в то время. Не было ни малейших признаков того, что γ -лучи отклоняются электрическим или магнитным полем.

Установив свойства этих трех излучений, можно было анализировать излучения, исходящие из различных радиоактивных веществ. Например, было найдено, что полоний — элемент, обладающий довольно большой радиоактивностью, который открыли супруги Кюри при поисках радия, — испускает только α -лучи. После того как все излучение полония пропускалось через достаточно толстый слой вещества, поглощавший α -лучи, не наблюдалось вообще никакой ионизации. Но не все α -лучи или β -лучи обладали одинаковыми свойствами; было ясно, что они отличаются от элемента к элементу. Правда, испускание β -лучей всегда сопровождалось испусканием γ -лучей.

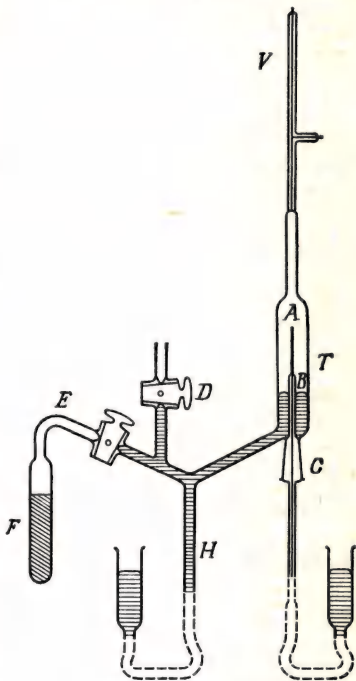
Как мы видели, первые исследователи радиоактивности вскоре пришли к выводу, что β -лучи представляют собой очень быстрые электроны. Что же такое α -лучи? Измерения отношения e/m мало могли помочь делу: точное измерение e/m сопряжено с большими трудностями и получить высокую точность не удавалось. Значение e/m для α -лучей радия, определенное с максимальной возможной точностью измерений, оказалось равным $6 \cdot 10^4$ Кл/г. Это примерно половина значения электрохимического эквивалента водорода, следовательно, α -частицы, какова бы ни была их природа, должны иметь атомные размеры. Если они несут единичный заряд, то их масса должна равняться удвоенной массе атома водорода. Резерфорд предположил, что α -частицы должны быть либо атомами водорода, либо атомами гелия. К 1908 г. Резерфорд был почти уверен, что они являются атомами гелия.

Как удостовериться в этом окончательно? Резерфорд решил испробовать «лобовой» метод — непосредственно

определить природу α -частиц путем спектрального анализа (стр. 87). Этот эксперимент больше, чем какой-либо другой, показывает способность Резерфорда находить необычные способы решения задачи. Теперь, конечно, спектроскопия стала привычным методом, но ученым, которые в то время занимались радиоактивностью и измеряли ее по ионизации фотографическим методом и с помощью электрического и магнитного полей, она должна была казаться весьма необычной. Это, несомненно, один из самых изящных решающих экспериментов в физике.

Идея Резерфорда была собрать достаточное число α -частиц, чтобы можно было пропустить через них электрический разряд и проанализировать это свечение с помощью спектрометра. Необходимо было, правда, иметь уверенность в том, что измеряемые атомы не попали в прибор извне или не были образованы каким-нибудь иным образом. Резерфорд и его сотрудник Ройдс создали прибор, показанный на фиг. 49. Важнейшей частью прибора была трубка *A* — очень тонкая стеклянная трубка, изготовленная с большим мастерством опытным стеклодувом и содержащая очищенную эманацию радия (стр. 185), которая —

это уже было известно — испускает только α -частицы. По прошествии некоторого времени газ, содержащийся в откачанной трубке *T*, можно перевести в разрядную трубку *V* и исследовать его там. Если бы при этом не получилось никакого результата, можно было дать газу снова расши-



Ф и г. 49. Прибор Резерфорда и Ройдса, с помощью которого они показали, что α -частицы — это ионы гелия.

рится в T и оставить его там на более продолжительное время.

Спустя 24 ч экспериментаторы произвели свое первое наблюдение. Они ничего не обнаружили. На следующий день они повторили опыт и увидели слабую желтую линию как раз на месте самой яркой линии в спектре гелия. Но одной линии было недостаточно. Через четыре дня удалось наблюдать желтую и зеленую линии гелия, а через шесть дней виден был уже практически весь спектр гелия.

Легко представить себе настроение обоих ученых, когда они получили этот результат. Эксперимент был блестяще задуман и, как оказалось, требовал как раз столько времени, чтобы не слишком долго держать экспериментаторов в ожидании. Теперь уже можно было не сомневаться в том, что α -частицы — это заряженные атомы гелия, а по значению e/m можно было заключить, что они несут двойной заряд; другими словами, α -частицы представляют собой ионы гелия. Четыре недели спустя Резерфорд сообщил об этом результате, выступая при вручении ему Нобелевской премии по химии.

С тех пор α -частицы стали у Резерфорда любимым инструментом исследования; для него они почти что были живыми существами, столь глубоко была связана с ними его научная деятельность. Альфа-частицы движутся со скоростью около $1/10$ скорости света и, будучи массивными частицами, способны разрушать другие атомы при столкновении с ними. Однако полный отчет о том, что делали с α -частицами Резерфорд и его сотрудники, увел бы нас слишком далеко от нашего повествования.

Основной вопрос, который должен быть задан, заключается в следующем: что происходит в атомах радиоактивных элементов, таких, как радий, приводя в результате к испусканию электронов, заряженных атомов гелия и проникающего излучения, которое, как выяснилось, почти несомненно аналогично рентгеновским лучам? К 1904 г. Резерфорд остановился на том, что радиоактивность была доказательством распада атомов. Радиоактивные атомы нестабильны, иногда один какой-нибудь атом самопроизвольно распадается и испускает часть своего вещества — α -частицу. При этом возникает атом нового типа, который тоже может быть нестабильным. Так продолжается до тех пор,

пока не достигается известная стабильность и не образуется нерадиоактивный элемент.

Об одном опыте с α -частицами здесь *необходимо рассказать*, поскольку это один из наиболее важных экспериментов в физике. Речь идет о наблюдении рассеяния α -частиц веществом, позволившем заключить, что атом содержит очень малое ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома, — концепция, совершенно отличная от модели атома Дж. Дж. Томсона («пудинг с изюмом», стр. 179).

История этого эксперимента весьма интересна, ибо он, видимо, обязан случаю. Может показаться обидным, что Резерфорд, всегда планировавший свои эксперименты, сделал, может быть, самое важное свое открытие таким образом; впрочем, это нисколько не умаляет его славы. У Резерфорда, видимо, имелось в запасе немало «пустяковых» экспериментов, предназначенных для натаскивания новых аспирантов. Неважно, если бы такие эксперименты оканчивались неудачно: они должны были помочь новичкам приобрести навыки в обращении с аппаратурой.

Так, в 1909 г. Марсдену (родился в 1889 г.), работавшему под руководством Гейгера (1882—1945), было предложено выяснить, могут ли α -частицы отражаться от золотой фольги. В эксперименте использовался один из излюбленных методов Резерфорда — наблюдение флуоресценции экрана из сернистого цинка под действием α -частиц. Если взять слабый источник излучения и микроскоп с небольшим увеличением, то наблюдатель, после того как его глаза адаптируются к темноте, может отмечать отдельные вспышки света. Каждая вспышка означает попадание в экран одной α -частицы. Таким путем можно фиксировать одиночные атомные события, и Резерфорду, несомненно, нравилось, когда аспиранты сами наблюдали это явление и пользовались им.

Резерфорд был абсолютно убежден в том, что массивные α -частицы должны испытывать лишь незначительные отклонения, проходя сквозь золотую фольгу. Большинство из них действительно проходило сквозь фольгу, лишь слабо отклоняясь. Но некоторые α -частицы — примерно одна из 20 000, — как заметил Марсден, отклонялись на углы больше 90° . Марсден даже боялся рассказать об этом Резерфорду и тщательно удостоверился сначала в том,

что в его опытах не было ошибки. Резерфорд почти не поверил в этот результат наблюдений, он воскликнул, что это самая неправдоподобная вещь в его жизни. Но в неправдоподобное пришлось поверить, и в 1911 г. Резерфорд пришел к убеждению, что результаты опытов по рассеянию α -частиц золотой фольгой можно объяснить, только предположив, что α -частицы проходят на весьма малом расстоянии от других положительно заряженных частиц с размерами, много меньшими размеров атомов. Атом золота должен состоять из малого положительного заряженного ядра и окружающих его электронов. Это было рождением идеи об атомном ядре и новой отрасли физики — ядерной физики.

Эта идея была к 1911 г. не совсем нова. Джонстон Стони выдвинул ее до 1906 г. как одну из возможных схем строения атома ¹⁾. Но о ней, видимо, забыли, к тому же идея Стони была чисто гипотетической. Достижение Резерфорда, несомненно, было значительно большего порядка.

Следующим шагом было выяснить, из чего состоит ядро атома. Ядро радия способно распадаться и испускать ядра гелия, каждое с массой, равной массе четырех протонов. Однако это еще не доказывает, что ядро радия содержит ядра гелия: они могут быть просто стабильными группировками, которые легко испускаются как единое целое. Точно так же испускание β -частиц вовсе не доказывает, что ядро содержит электроны. Тем не менее такое представление об атомах держалось долгое время: считалось, что атомы содержат ядра, которые состоят из протонов и электронов, прочно связанных — неизвестно, как именно, — друг с другом, а вокруг ядер вращаются другие, внешние электроны. Чтобы атом был электрически нейтрален, общее число электронов должно быть равно общему числу протонов.

Эта картина изменилась, когда в 1932 г. Чэдвик (родился в 1891 г.) открыл новую элементарную частицу — нейтрон. Новая частица была обнаружена при бомбардировке бериллия α -частицами — еще один эксперимент «резерфор-

¹⁾ А до Стони — японский физик Нагаока и еще некоторые ученые. Но все эти гипотезы были сугубо умозрительными, тогда как идея Резерфорда основывалась на эксперименте. — *Прим. ред.*

довского типа». Обнаруженное при этом проникающее излучение не производило ионизации, поэтому его сначала приняли за γ -излучение, особенно ввиду того, что оно не испытывало отклонения в электрическом и магнитном полях. Но Чэдвик понял, что энергии, фигурировавшие в эксперименте, не совместимы с этой точкой зрения, и показал, что единственная возможность заключается в том, что обнаруженное проникающее излучение представляет собой поток незаряженных частиц с массой, равной массе протонов. Бериллий и гелий, соединяясь, образуют углерод, который испускает эти частицы в процессе взаимодействия¹⁾.

В нашем стремительном рассказе мы проскочили мимо многих крупнейших достижений физики этих лет: первого искусственного расщепления атомного ядра в 1919 г. с помощью α -частиц естественных радиоактивных элементов, искусственного ускорения частиц в 1930 г. и получения еще более высоких энергий с помощью циклотрона в 1931 г. К этому времени природа ядер стала значительно более ясной: ядра можно было рассматривать как комбинацию нейтронов и протонов, причем два нейтрона и два протона образуют особенно стабильную группировку, которая может испускаться в виде α -частицы, а испускание β -частиц — как результат превращения нейтронов в протоны. Однако, соответствуют ли эти картины действительности в скольконибудь большей степени, чем представление о внутриядерных²⁾ и внеядерных электронах, никто не знает.

С этого времени ядерная физика стала быстро развиваться. В 1939 г. были получены первые экспериментальные данные о распаде ядра на две примерно равные части с выделением большого количества энергии. Этот процесс был назван делением ядра. В 1942 г. удалось осуществить управляемое деление ядер в большом масштабе. Это дало возможность получить одновременно новый источник энер-

1) На самом деле при бомбардировке бериллия α -частицами возникают и нейтроны, и γ -лучи. Но «бериллиевое излучение» представляло протоны двигаться с такими скоростями, какие никогда не могли создать γ -лучи. Это привело Чэдвика к мысли, что в этой ядерной реакции появляются нейтроны, предсказанные его учителем Резерфордом еще в начале 20-х годов. — *Прим. ред.*

2) Как показывает волновая механика (см. гл. 12), электроны не могут находиться в атомных ядрах, а образуются в момент превращения нейтрона в протон при β -распаде. — *Прим. ред.*

гии и создать атомную бомбу. В 1952 г. был осуществлен ядерный синтез—слияние двух ядер, которое опять-таки сопровождается выделением энергии, значительно бóльшим, чем при ядерном делении. Это позволило создать еще более мощное оружие — водородную бомбу. Что касается управляемого ядерного синтеза, то его осуществимость до сих пор не доказана, и сегодня человечество еще не в состоянии воспользоваться величайшим благом, которое сулит реализация этого процесса,— возможностью получения почти неограниченного количества энергии.

Итак, простое наблюдение, сделанное Беккерелем в 1896 г., позволило физике пройти за 70 лет длинный путь. Оно позволило заглянуть внутрь атома; оно разрушило большую часть представлений Дальтона об атомах, оставив в то же время почти нетронутыми дальтоновские химические теории; оно привело к преддверию новых возможностей создания неисчерпаемого источника энергии или к перспективе полного уничтожения жизни на нашей планете.

12. Ограниченность представлений классической физики

В этой главе я попытаюсь объединить некоторые темы, рассмотренные в предыдущих главах. По необходимости приходится идти на сверхупрощения, поскольку некоторые вопросы вообще нельзя объяснить в рамках обычных представлений, и я буду вынужден пользоваться моделями, которые большинство физиков-теоретиков, вероятно, сочтут совершенно неудовлетворительными. Мое оправдание в том, что эти модели могут дать полезную картину, да и в том, что — неважно, ошибочны они или нет, — они помогли вывести физику на современный ее уровень. Всем, кто изучает физику, необходимо знать, как она развивалась; это, может быть, важнее, чем досконально изучить сегодняшние идеи, которые в конце концов могут и сами измениться.

Поразительно, насколько далеко может продвинуться физика, опираясь на чисто классические представления. Наш мозг устроен так, что он приспособливается к тому миру, который мы в состоянии воспринимать нашими органами чувств. Но нет никаких оснований полагать, что законы, применимые к окружающему нас большому миру, действуют также в атомном и субатомном мире. Однако мы умеем проделывать гигантские экстраполяции, и получаемые результаты все еще имеют известный смысл! Превосходным примером может служить открытие Резерфордом атомного ядра (стр. 190), размер которого порядка 10^{-13} см. Резерфорд опирался на законы действующих сил, аналогичные тем, что применимы к движению планет ¹⁾.

¹⁾ Следует учитывать, что движение электрона в атоме и движение планет вокруг Солнца имеют лишь очень приблизительную и внешнюю аналогию; законы же сил в атомах и в Солнечной системе не имеют ничего общего друг с другом. — *Прим. ред.*

Но экстраполяцию такого типа нельзя продолжать беспредельно: применимость классических представлений должна где-то закончиться. Действительно, мы знаем, что есть самые обычные эффекты, которые в рамках классической физики не удастся объяснить. В XIX столетии эти эффекты «отложили» в надежде, что они сами проявятся. Но они не проявились.

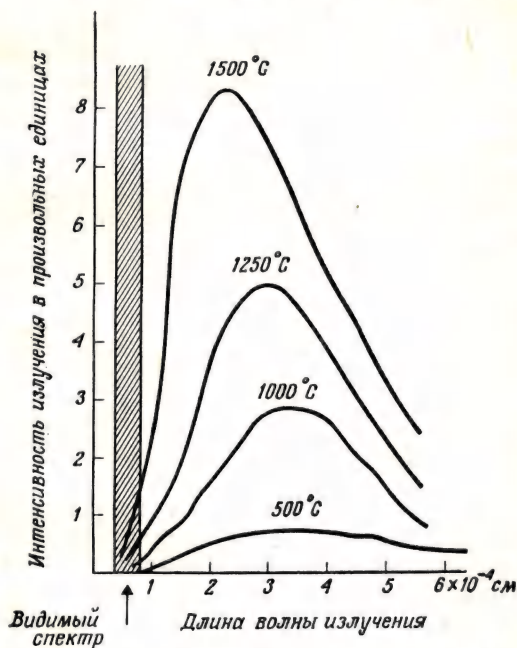
Один из самых простых эффектов — это изменение цвета тел при нагревании. Как только температура тела становится выше температуры окружающей среды, оно начинает испускать больше энергии, чем получает, и мы можем ощущать это излучение по повышению температуры. При температуре примерно 550°C тело начинает излучать видимый свет в красном конце спектра; по мере повышения температуры область излучаемого спектра расширяется, пока при очень высоких температурах, 1000°C и выше, тело не раскаляется добела. Почему это происходит?

Одним из физиков, которые поняли, что предстоит решить серьезную задачу, был Рэлей (1842—1919). Он указал, что если бы энергия системы распределялась поровну между всеми возможными в ней видами колебаний, то на короткие волны приходилось бы значительно больше энергии, чем на длинные, просто потому, что их намного больше, как это видно из аналогии со стоячими волнами на натянутой струне (стр. 65).

Первые измерения распределения энергии в спектрах излучения раскаленных твердых тел провели в 1893 г. Луммер (1860—1925) и Прингсгейм (1859—1917). Чтобы получить абсолютные результаты, необходимо было пользоваться абсолютно черным телом, т. е. телом, которое поглощает все падающее на него излучение. Хорошее приближение к черному телу дает полое тело с небольшим отверстием в стенке полости. При нагревании такого тела излучение, исходящее из полости, сходно с излучением абсолютно черного тела. Излучение разлагалось в спектр призмой из плавикового шпата и измерялось болометром — прибором, основанным на изменении сопротивления платины с температурой. (Этот прибор был усовершенствован в Америке Ленгли примерно в 1881 г.) С помощью чувствительного мостика Уитстона удавалось зафиксировать

очень малые изменения сопротивления; так, сообщалось, что чувствительность при измерении температуры этим прибором составляла 10^{-6}°C .

Типичные результаты измерения спектров раскаленных тел представлены на фиг. 50. При определенной длине



Ф и г. 50. Распределение интенсивности (в относительных единицах) в спектрах излучения раскаленных тел.

Обратите внимание на то, что кривая при 500 °C не доходит до видимой области спектра.

волны наблюдается максимум интенсивности излучения, который по мере повышения температуры перемещается в область более коротких длин волн. Температура красного каления — это температура, при которой коротковолновая граница кривой распределения достигает красного конца спектра. При более высоких температурах излучение охватывает более широкую часть видимого спектра. При самых высоких температурах достигается ультрафиолето-

вая область спектра. Возрастание интенсивности излучения с уменьшением длины волны, отвечающее правой ветви кривых, находилось в согласии с теоретическими расчетами Рэлея и Джинса (1877—1946), в то время как уменьшение интенсивности в области коротких длин волн не совпадало с расчетами. В этом и состояла теоретическая проблема.

Другая проблема возникла в связи с измерениями атомной теплоемкости. Как мы видели, Пти и Дюлонг (стр. 37) считали, что будущие точные измерения удельных теплоемкостей выявят одинаковое значение атомных теплоемкостей всех элементов. Они были бы крайне разочарованы, узнав о результатах более поздних измерений; эти результаты указывали, что некоторые элементы, например углерод в виде алмаза, обладают чрезвычайно низкими удельными теплоемкостями. В то же время из теории как будто следовало (стр. 37), что атомные теплоемкости всех веществ должны быть одинаковы.

Ученые испытывают большое разочарование, когда после серии измерений, получивших удовлетворительное теоретическое объяснение, появляются новые измерения, результаты которых расходятся с теорией. Известное утешение они получили, когда выяснилось, что удельная теплоемкость алмаза возрастает с повышением температуры и при достаточно высокой температуре приходит к совпадению с теоретической. Точно так же обстояло дело со всеми другими элементами, удельная теплоемкость которых не совпадала с выводами теории. Но проблема лишь отодвигалась на другой уровень. Что означала зависимость удельной теплоемкости от температуры? Это была еще одна фундаментальная проблема классической физики.

Третью проблему представляло собой странное поведение некоторых материалов при воздействии на них света. Еще в 1839 г. А. С. Беккерель (1788—1878) — дед ученого, открывшего радиоактивность (стр. 180), заметил, что у одного из гальванических элементов, с которыми он работал, электродвижущая сила изменялась, когда на один из электродов падал свет. В 1873 г. Уиллоуби Смит заинтересовался непостоянным поведением одной электрической цепи и в конце концов обнаружил, что оно связано с погодой: когда светило солнце, кусок селена, включенный в цепь, менял свои свойства. В 1887 г. Герц, проводивший опыты

по передаче открытых им незадолго до того электромагнитных волн, заметил, что индуцируемая искра проскакивала легче, когда искровой промежуток не был ничем заслонен от индуцирующей искры.

Это оказалось еще одним замечательным открытием Герца. Сделать его было непросто, так как было множество других факторов, которыми можно было объяснить этот, в конечном счете лишь незначительный эффект. Чтобы выяснить, вызывается ли он светом, Герц поместил между обоими искровыми промежутками непрозрачный экран и убедился в том, что индуцируемая искра оказалась явно слабее. Тогда он взял кусок стекла и получил тот же эффект. Герц был озадачен, пока не сообразил, что стекло пропускает только видимый спектр. Когда он взял кварц, который пропускает ультрафиолетовые лучи, индуцированная искра не ослаблялась. Таким образом, наблюдаемый эффект вызывался ультрафиолетовым излучением, идущим от индуцирующей искры. Сегодня можно продемонстрировать этот эффект более четко, направив прямо на искровой промежуток ультрафиолетовые лучи.

Все эти явления на самом деле, однако, не создавали серьезных затруднений для классической физики. Они были не более необычными, чем, например, открытое Фарадеем магнитное вращение плоскости поляризации света (стр. 134). Можно было надеяться найти им объяснение в рамках классической физики.

Но вот следующее явление было более загадочным. В 1888 г. Гальвакс (1859—1922) обнаружил, что ультрафиолетовые лучи разряжают отрицательно заряженный электроскоп, тогда как с положительно заряженным электроскопом при этом ничего не происходило. Почему существовала такая разница? Причина в том, что при избытке электронов ультрафиолетовое излучение может сообщить им достаточную энергию, чтобы они смогли вырваться из электрода, но оно ничего не может сделать при недостатке электронов.

Это объяснение явления, которое названо фотоэлектрическим эффектом, стало очевидным, когда был открыт электрон, и физики занялись этим явлением, стремясь разобраться в нем до конца. Опыты Томсона, проведенные им в 1899 г., показали, что частицы, испускаемые под дей-

ствием частиц ультрафиолетового света, действительно являются *электронами*. Томсон подобрал напряженность магнитного поля, при которой испускаемые частицы не могли достигать пластинки, находившейся под положительным потенциалом и расположенной на известном расстоянии от источника частиц в вакууме. Отсюда он определил отношение e/m , которое оказалось равным $7,3 \cdot 10^7$ Кл/г. Это как раз равно отношению e/m для электронов (стр. 164). Томсон указал, что ток в вакуумной трубке не убывал до нуля столь резко, как он ожидал, и предположил в качестве возможного объяснения, что электроны вылетают со скоростями, отличными от нуля.

В 1900 г. Ленард получил такие же результаты несколько иным методом и ко всему еще смог выяснить, обладают ли вылетающие электроны не равной нулю скоростью. Если скорость вылетающих электронов отличалась от нуля, то они могли достигать другого электрода, даже когда он был отрицательно заряжен. Скорость вылетающих электронов можно, таким образом, определить по напряжению, при котором ток уменьшается до нуля. Ленард обнаружил при этом поразительный факт: скорость вылетающих электронов не зависела от интенсивности света. При более интенсивном освещении испускалось *больше* электронов, но скорость, с которой они вылетали, *не увеличивалась*. Скорость зависела от длины волны света, она была тем больше, чем короче длина волны. Оставаясь в рамках классической физики, нельзя было объяснить, почему увеличение энергии пучка падающего света не приводило к испусканию электронов с большей энергией.

Четвертая проблема была связана с самим существованием линейчатых спектров газового разряда (стр. 87). До сих пор мы рассматривали это лишь как экспериментальный факт, который можно с успехом использовать. Но классическая физика не давала ключей к истолкованию этого явления. Очевидно, что в атомах что-то колебалось, — вероятно, электроны. Не имела объяснения и закономерность, установленная в 1885 г. Бальмером (1825—1898). Бальмер нашел простую формулу, связывающую некоторые линии в спектре водорода:

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

В этой формуле ν — частота, соответствующая данной линии (скорость/длина волны); m — целое число ¹⁾ и R — постоянная, известная сейчас с точностью до семи значащих цифр ²⁾. Позднее были обнаружены в спектре водорода другие очень похожие серии, но серия Бальмера была единственной, линии которой с наибольшей интенсивностью находились в видимой области (фото XVI).

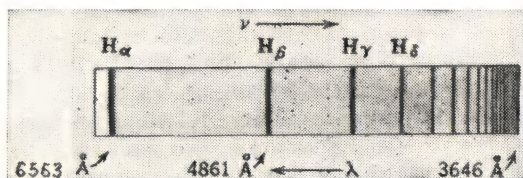


Фото XVI. Серия Бальмера линейчатого спектра атома водорода.

Таковы были наиболее важные проблемы, ожидавшие решения в конце XIX столетия. Первой поддалась решению как раз первая из них — задача об излучении абсолютно черного тела. Но, как мы увидим, решение ее не удалось сразу и четко понять, чтобы безоговорочно уверовать в его правильность.

Планк (1858—1947) понимал, что если существует объяснение спада интенсивности в области коротких длин волн, то нужно найти какой-то метод уменьшения энергии в этой области. Как поступает правительство, стремясь сократить расходы на определенные потребности? Оно вводит налог, благодаря чему соответствующие потребности обходятся дороже. Это не значит, что будет расходоваться больше денег, ибо меньшее число людей будет в состоянии позволить себе покупать по более высоким ценам. И вот Планк высказал в 1900 г. предположение, что, возможно, энергия, переносимая излучением, делится на небольшие порции (кванты), величина которых пропорциональна

¹⁾ Больше 2. — Прим. ред.

²⁾ Так называемая постоянная Ридберга, равная $109\,677,57 \pm \pm 0,01 \text{ см}^{-1}$. — Прим. ред.

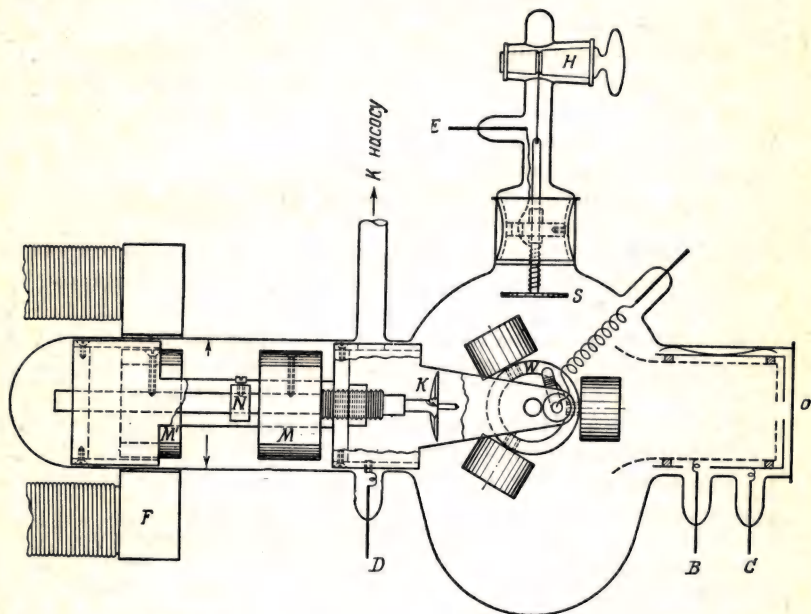
частоте ν . Коэффициент пропорциональности, известный ныне под названием постоянной Планка, он обозначил h . Планк показал, что выводы, к которым приводит его идея, превосходно согласуются с результатами Луммера и Прингсгейма.

Наверное, ни одна научная теория не выдвигалась с такой неохотой, как эта. Планк предложил ее лишь как эмпирическое решение проблемы, которое, он надеялся, будет заменено лучшим. Новая теория никому особенно не нравилась, настолько она казалась странной. И ее «пустили по боку». Но не все ее забыли. В 1905 г. теорию квантов возродил Эйнштейн, используя ее для объяснения результатов экспериментов Ленарда по фотоэлектрическому эффекту. Предположим, что электрон освобождается и вылетает под действием одного из планковских квантов $h\nu$. Энергия электрона будет зависеть только от энергии кванта. Это и объяснило результат Ленарда, заключающийся в том, что интенсивность света не влияет на энергию вылетающих электронов. Чем больше интенсивность света, тем больше квантов и, следовательно, освобождается большее число электронов. Теперь все удавалось объяснить по крайней мере качественно. Теория Эйнштейна была сразу же воспринята большинством ученых, хотя отнюдь не всеми, и это позволило квантовой теории «встать на ноги».

Однако теория Эйнштейна требовала надлежащей проверки, а полученные к тому времени результаты были недостаточно хорошими, чтобы их можно было считать вполне убедительными. Фотоэлектрический эффект разыгрывается на поверхности, и ничтожные ее загрязнения способны привести к очень большим ошибкам. Поэтому в 1916 г. Милликен решил направить усилия на получение действительно надежных результатов. Он изготовил прибор (фиг. 51), в котором можно было направлять свет на несколько различных поверхностей и очищать их прямо в вакууме. Метод Милликена был основан на методе Ленарда — измерении напряжения, при котором электроны, испускаемые в фотоэлектрическом эффекте, не попадают на противолежащий электрод. Используя свет различных длин волн, Милликен сумел показать, что энергия кванта как раз равна сумме кинетической энергии электрона и некоторой постоянной по величине энергии, которая должна быть

затрачена для выхода электрона через поверхность металла.

Таким образом, теория Планка позволила решить две из упомянутых наших проблем, связанных с излучением и с фотоэффектом.



Ф и г. 51. Прибор Милликена для изучения фотоэлектрического эффекта.

В 1912 г. Дебай (1884—1966) косвенным путем показал, что квантовая теория позволяет объяснить аномальные результаты измерений удельной теплоемкости. Дебай рассматривал твердое тело как сплошную среду, которую можно заставить совершать различные виды колебаний, подобно натянутой струне (стр. 65), но в трех измерениях. Более коротким волнам соответствуют более высокие частоты, и распределение энергии в этой области должно соответствовать требованиям квантовой теории. Теория Дебая правильно предсказывала зависимость удельной

теплоемкости от температуры, а ширину участка этой зависимости в шкале температур можно было приписать величине силы взаимодействия атомов твердого тела. Не удивительно, что алмаз, самое твердое из известных веществ, у которого, следовательно, силы межатомного взаимодействия должны быть наибольшими, обнаружил самую большую аномалию.

Наиболее трудной оказалась проблема линейчатых спектров, но и она уступила квантовой теории, хотя лишь после того, как было принято еще одно предположение, которое шло вразрез с привычными представлениями. Атом водорода состоит из центрального ядра и обращающегося вокруг него электрона. Если бы электрон двигался по круговой орбите по законам движения планет, т. е. сила притяжения, подобно гравитационной силе, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ним и ядром, то он должен был бы излучать некую характерную частоту. Однако не существовало причины, которая поддерживала бы эту частоту постоянной: электрон излучает энергию и должен, постепенно приближаясь к ядру, в конце концов упасть на него. Но атомы водорода вовсе не ведут себя подобным образом: они устойчивы в течение сколь угодно длительного времени и в то же время излучают вполне характерные частоты.

В 1913 г. Бор (1885—1962) обратился за помощью к квантовой теории. Он заявил, что, поскольку электрон не может испускать доли кванта, он нормально совсем не излучает и находится в состоянии с определенной энергией, которое называется стационарным. Если, возбудив каким-то образом электрон, заставить его перейти в состояние с более высокой энергией, то он может испустить квант энергии и снова перейти в нижележащее состояние. С помощью ряда простых и правдоподобных предположений Бор сумел показать, что испускаемые кванты отвечают излучению в точности тех длин волн, которые дает формула Бальмера. Этот результат был столь замечательным, что сразу же получил признание, хотя Резерфорд высказал ряд оговорок в отношении теории, так резко расходившейся с его собственными «механистическими» идеями.

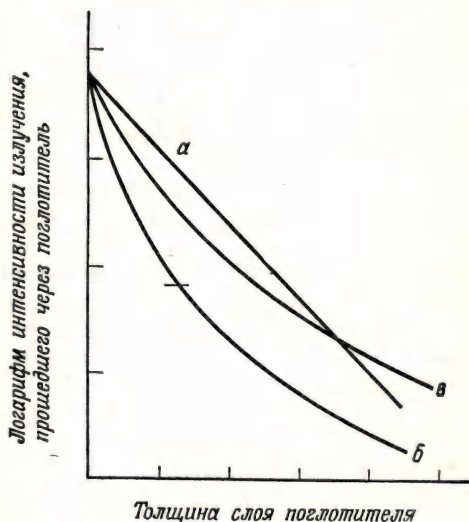
Теперь, однако, теория Бора утратила свое значение, она выглядит лишь правдоподобной, но далеко не вполне

убедительной. С ее помощью не удастся хорошо объяснить поведение других атомов, кроме атома водорода. Некоторые преподаватели высшей школы утверждают даже, что эта теория вводит в заблуждение и ее не следует преподносить студентам. На самом же деле исключить ее из курса физики было бы ошибкой. До 1913 г. представление о стационарных состояниях атома отсутствовало, после 1913 г. оно вошло в жизнь. Это представление имеет для физики такое фундаментальное значение, что было бы очень жаль, если бы студенты не знали о его драматическом появлении и думали, будто оно возникло просто в результате логических манипуляций теоретиков. Физика состоит не только из сводки правильных ответов.

Линейчатые спектры должны обнаруживаться в любом электромагнитном излучении, и вскоре было найдено, что, помимо серии Бальмера, существуют другие серии в инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра. Но, что более важно — ввиду более простой интерпретации в этом случае, — линейчатые спектры, как мы видели на стр. 174, существуют и в области рентгеновского излучения. Такое характеристическое излучение, как его называют, было впервые обнаружено Баркла в 1908 г. еще до открытия дифракции рентгеновских лучей. Баркла интересовался рассеянными рентгеновскими лучами (стр. 148), и замечательно, что ему удалось сделать такое фундаментальное открытие имевшимися в его распоряжении грубыми методами.

Метод Баркла был основан на зависимости между интенсивностью пучка рентгеновского излучения и толщиной материала, через который пропускался пучок. Если бы излучение было однородным, то утолщение слоя материала на одну и ту же величину приводило бы к пропорциональному уменьшению интенсивности и график зависимости логарифма интенсивности от толщины должен был бы представлять собой прямую линию (кривая *a* на фиг. 52). Если же излучение неоднородно, то компоненты излучения, испытывающие большее поглощение, должны были постепенно отфильтровываться, что и наблюдалось в действительности. Поглощательные характеристики должны меняться, и график уже не будет прямой линией (кривая *b* на фиг. 52).

В 1908 г. Баркла и Садлер исследовали таким простым способом рентгеновские лучи, рассеянные различными элементами. Прежде всего они построили кривую поглощения для излучения, исходящего из рентгеновской трубки, пропуская его через пачку из листов алюминия толщиной 0,1 мм и постепенно увеличивая толщину пачки.



Ф и г. 52. Зависимость между интенсивностью излучения, прошедшего через поглотитель, и толщиной поглотителя.

a — однородное излучение; *б* — неоднородное излучение и *в* — смесь излучений, содержащая интенсивную коротковолновую компоненту.

Излучение рентгеновской трубки оказалось неоднородным. При исследовании излучения, рассеянного элементами вплоть до серы, были получены такие же кривые, откуда следовало, что рассеянное излучение имело ту же природу, хотя, конечно, интенсивность его была значительно меньше. Однако в случае элементов от хрома до цинка кривые обнаруживали тенденцию к выпрямлению (кривая *в* на фиг. 52), что указывало на присутствие какой-то преобладающей компоненты. Кроме того, наклон прямого участка кривых был характерным для соответствующего элемента;

наименьшим для цинка и наибольшим для хрома. Поэтому исследователи пришли к выводу, что излучение, рассеянное тем или иным элементом, содержит характерную для этого элемента компоненту. Баркла и Садлер назвали ее *K*-излучением. Работая с различными напряжениями возбуждения рентгеновской трубки, они обнаружили менее проникающие характеристические излучения тех же элементов, которые они назвали *L*-излучениями.

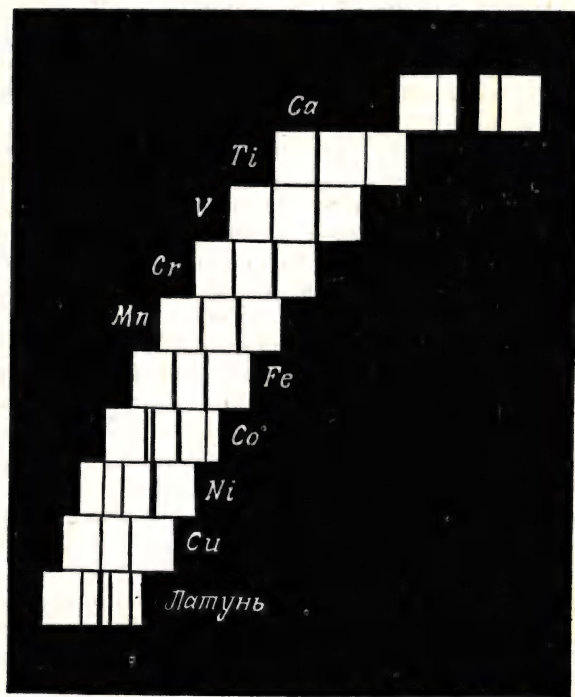
Как мы теперь знаем, эти излучения были вновь открыты У. Г. Брэгом в экспериментах по дифракции рентгеновских лучей. К сожалению, Баркла не заинтересовался новым методом, и его последующее открытие *J*-излучения, более жесткого, чем *K*-излучение, так и не было подтверждено. В физике известны случаи (см. стр. 76 и 91), когда ученые, раньше других работавшие в какой-то области, отвергали новые, более совершенные средства исследования.

Открытием Брэга воспользовался молодой ученый Мозли (1887—1915), который снял фотографии дифракционных картин для рентгеновских лучей, испускаемых различными элементами. Он показал (фото XVII), что существуют систематические изменения характеристических рентгеновских спектров от одного химического элемента к другому, и сумел расположить элементы в правильном порядке в соответствии с периодической системой Менделеева. В частности, он показал, что железо, кобальт и никель должны располагаться именно в таком порядке, а не в порядке, даваемом их атомными весами (55,8; 58,9; 58,7).

Мозли проделал блестящую работу. В те дни, когда считалось подвигом изготовление обыкновенной рентгеновской трубки, он сделал трубку, в которой можно было вращать анод и подставлять под пучок катодных лучей разные его участки. Мозли провел опыты, несмотря на то что Резерфорд отговаривал его, убеждая заняться изучением радиоактивности совместно со своей группой. По словам Резерфорда, другие исследователи были более компетентны в области рентгеновских лучей, чем манчестерская школа. Экспериментальная физика понесла огромную потерю с гибелью Мозли. Он был убит в первую мировую войну в момент, когда приказ о его демобилизации уже находился в пути. Работа Мозли поставила на прочную

физическую основу понятие атомного номера, который до того был просто числом, определявшим порядок следования элементов в периодической системе.

Мы видим теперь, что события 1895—1913 гг. не просто расширили границы физики, они произвели в ней коренные



→ Длина волны

Фото XVII. Фотография рентгеновских характеристических спектров элементов от титана до меди, снятая Мозли.

Приведены также рентгеновские спектры кальция и латуни.

изменения, мы бы сказали, даже научную революцию. Начиная с 1913 г., если не считать пробела, связанного с первой мировой войной, новые идеи появлялись в таком обилии, что их невозможно здесь даже кратко осветить. Но об одной из них необходимо сказать несколько слов,

учитывая как ее огромное теоретическое значение, так и практические приложения. Речь идет о волновой механике, введенной Л. де Бройлем (родился в 1892 г.) в 1924 г.

Идея де Бройля возникла на основе принципа симметрии в физике, согласно которому если A вызывает какой-то эффект в B , то B вызывает тот или иной эффект в A . Именно соображения такого рода убедили Фарадея в том, что магнетизм способен создавать электричество (стр. 128). Аргументация де Бройля состояла в следующем: поскольку теория Планка показала, что волны обладают в некотором смысле свойствами частиц¹⁾, не могут ли частицы в каком-то смысле обладать свойствами волн? Он сделал вполне определенное предположение, что если тело обладает импульсом p , то оно ведет себя как волна с длиной волны h/p , где h — постоянная Планка.

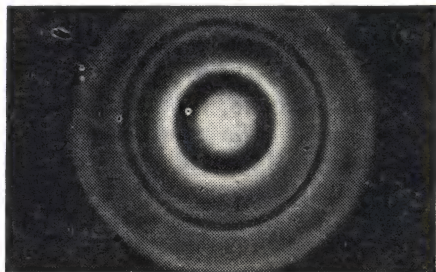
Это, казалось бы, явно абсурдное предположение было некоторыми учеными принято всерьез. В течение нескольких лет были проведены два различных эксперимента, и они показали, что электроны, в самом деле, способны давать дифракционную картину. Первый из опытов, выполненный Дэвиссоном (1881—1958) и Джермером (родился в 1896 г.), был в известной степени случайным; второй эксперимент, который провел Дж. П. Томсон (родился в 1892 г.), сын Дж. Дж. Томсона, был поставлен специально с целью такой проверки.

Дэвиссон изучал рассеяние электронов никелем, и его привели в недоумение неожиданные максимумы в результатах измерений рассеяния. Случайно в приборе образовалась течь и никель окислился. Дэвиссон попытался наскоро удалить окись прокаливанием образца в вакууме, но когда он повторил измерения, картина рассеяния заметно изменилась: максимумы стали значительно более ярко выраженными. С никелем, в самом деле, произошли изменения — вместо множества очень мелких кристаллов появилось несколько крупных! Только тогда Дэвиссон, услышав об идеях де Бройля на конференции в Англии, связал полученные им результаты с новой теорией. В следующих опытах Дэвиссон и Джермер измеряли рассеяние

¹⁾ Точнее — теория фотоэффекта Эйнштейна, согласно которой кванты света могут, подобно частицам, выбивать электроны. — *Прим. ред.*

электронов монокристаллом никеля, причем ускоряющие напряжения у них были всего 150 В. К 1928 г. исследователи получили полное согласие с теорией де Бройля.

Опыты Томсона носили значительно более прямой характер. Он экспериментировал с электронами, ускоренными примерно до 30 000 В, пропуская их через тонкую золотую фольгу. Томсон получил систему колец (фото XVIII), которую можно было прямо сопоставить соответ-



Ф о т о XVIII. Фотография дифракции электронов на золотой фольге, полученная Дж. П. Томсоном.

ствующим дифракционным картинам для рентгеновских лучей, и также получил в 1928 г. полное согласие с теорией де Бройля.

Пока еще неизвестно, каким образом частица может также вести себя как волна; в этом смысле идея де Бройля и сейчас, спустя 40 лет, еще не полностью волилась в физику¹⁾. По-видимому, нет таких экспериментов, в которых корпускулярные и волновые характеристики можно было бы зарегистрировать одновременно. Но физики-теоретики, видимо, вполне довольны и без определенной физической картины создали теорию — волновую механику, которой

¹⁾ В самом деле, создать наглядную, в духе классической физики картину взаимоотношений волновых и корпускулярных свойств частицы идея де Бройля не позволяет. Как известно, модель «волны-пилота» де Бройля оказалась неудовлетворительной. Но это отнюдь не означает, что основная идея современной квантовой механики «еще не полностью волилась в физику». — *Прим. ред.*

широко пользуются для решения задач физики и химии. Например, теперь она заменила теорию Бора для водородного атома (стр. 202). Однако более подробное изложение этой теории увело бы нас слишком далеко от цели этой книги.

Следует все же сказать несколько слов о трех важных практических результатах появления волновой механики. Поскольку можно осуществить дифракцию частиц, например электронов и нейтронов, эти частицы могут давать информацию такого же рода, как и рентгеновские лучи. При напряжениях порядка 50 000 В можно получить пучки электронов с длиной волны, значительно меньшей, чем у рентгеновских лучей. Дифракцию электронов удалось с успехом применить для изучения поверхностей твердых тел, поскольку электроны не проникают глубоко внутрь материалов. Нейтроны менее доступны, так как для получения достаточно интенсивных пучков нейтронов необходим ядерный реактор. Однако изучение дифракции нейтронов оказалось значительно более крупным шагом вперед, чем дифракции электронов. Дело в том, что нейтроны ведут себя подобно маленьким магнитикам и способны взаимодействовать с теми частями атомов, которые обуславливают парамагнитные свойства вещества; в большинстве атомов нейтроны взаимодействуют только с ядром. Наблюдение магнитного взаимодействия позволило получить прямое подтверждение идеи, выдвинутой в 1932 г. Неелем (родился в 1904 г.), что существуют другие виды магнетизма, кроме ферромагнетизма, парамагнетизма и диамагнетизма¹⁾. Однако подробное изложение работы Нееля и рассказ о том, как результаты этой работы подтвердились наблюдением дифракции нейтронов, заняли бы в этой книге слишком много места.

Третий «продукт» волновой механики имеет еще более важное значение. Речь идет о создании нового прибора, который в свою очередь оказал большое влияние на развитие науки, — электронного микроскопа. Поскольку электроны способны испытывать преломление — их траектории могут изгибаться под действием электрических

¹⁾ Речь идет об антиферромагнетизме, при котором отдельные атомные магнитики стремятся в противоположность ферромагнетизму выстраиваться не вдоль, а навстречу друг другу. — *Прим. ред.*

и магнитных полей, — можно, придав этим полям подходящую конфигурацию, сделать электронно-оптические «линзы». Длины волн электронов могут быть сделаны очень малыми (легко получить длины волн меньше 10^{-9} см),

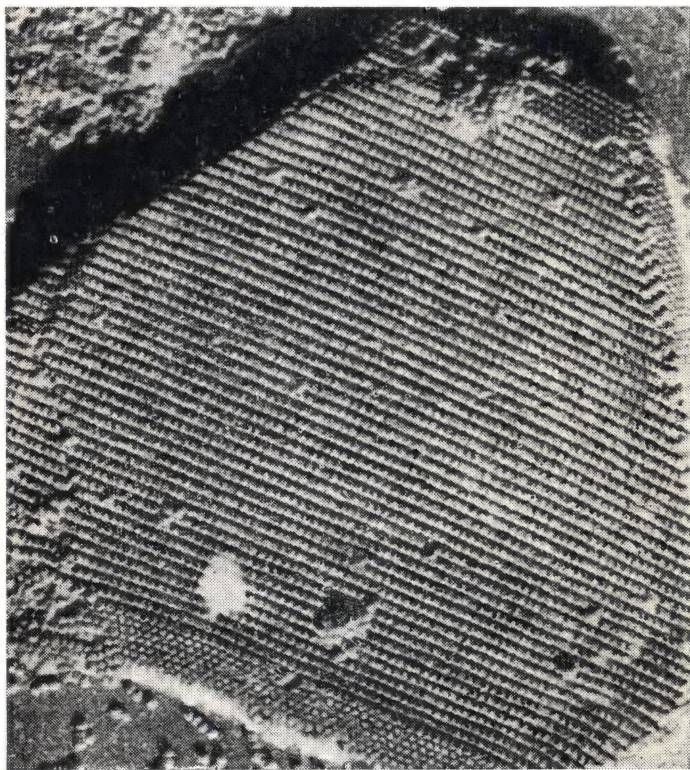


Фото XIX. Электронно-микроскопический снимок кристаллического вирусного белка.

и, следовательно, разрешение электронного микроскопа может быть меньше атомных размеров. Эту мысль высказал в 1926 г. Буш (родился в 1884 г.). Идея Буша была подхвачена, но выявились значительные технические трудности при попытке получить стабильные напряжения и создать

поля нужной конфигурации. К концу 30-х годов удалось добиться разрешающей способности, соответствующей оптическим микроскопам, а сейчас получают разрешение порядка 10^{-7} см ¹⁾.

Электронный микроскоп обладает большими недостатками: на нем можно работать только с достаточно тонкими образцами, которые пропускают электроны и, кроме того, сохраняют свои свойства в вакууме ²⁾. Но, несмотря на эти трудности, применение электронного микроскопа внесло огромный вклад в науку. Впервые оказалось возможным «увидеть» молекулы в кристаллах (фото XIX) в полнейшем согласии с представлениями об образовании кристаллов, выдвинутыми первыми исследователями (стр. 150). Что касается биологии, то можно смело сказать, что в этой области естествознания электронный микроскоп произвел революцию.

На этом я должен закончить главу. Приятно в заключительных строках привести пример того, как успехи в экспериментальных исследованиях ведут к появлению новых теорий, которые затем наводят ученых на мысль о создании новых приборов, способствующих дальнейшему прогрессу науки. Интересно, как долго будет продолжаться этот процесс?

¹⁾ И даже выше, примерно до $2 \cdot 10^{-8}$ см, позволяющее увидеть отдельные атомные плоскости решетки кристаллов.— *Прим. ред.*

²⁾ Существуют и электронные микроскопы, работающие не на «просвет», а на «отражение», но они имеют сравнительно невысокую разрешающую способность.— *Прим. ред.*

13. Будущее физики

Повторим еще раз вопрос, заданный в конце предыдущей главы: будет ли продолжаться прогресс физики? Есть ли у кого-нибудь сомнения на этот счет? Говоря по правде, у меня есть. Каждый физик знает, что экстраполяция — опасная вещь, и мы должны с осторожностью применять ее к нашему собственному предмету.

У физики, несомненно, есть движущая сила, но есть ли у нее источник внутренней энергии, который помогал бы преодолевать неизбежные помехи движению вперед? Существуют два направления, в которых нам следует вести поиски: во-первых, поиск новых физических явлений и, во-вторых, области, требующие серьезного продвижения вперед в создании новых теорий. Что касается первого направления, то у нас мало данных о таких явлениях: в самом деле, сейчас нет ничего такого, что можно было бы сравнить с разрядной трубкой прошлого столетия. Если же говорить о последнем, то можно назвать по крайней мере три области физики, в которых предстоит немало сделать.

Во-первых, это связь между гравитацией и электромагнетизмом. Большинство физиков чувствует, как, несомненно, должен был бы чувствовать Фарадей, что между ними должна существовать какая-то связь, но до сих пор она ускользает от лучших теоретиков.

Во-вторых, это природа сил, сохраняющих атомное ядро как единое целое. Совокупность частиц, главным образом положительно заряженных и заключенных в области пространства порядка 10^{-13} см, готова в любой момент «взорваться» под действием колоссальных сил электростатического отталкивания, и тем не менее атомные ядра явно стабильны. Какова природа ядерных сил, преодоле-

вающих действие известных нам электростатических сил на таких невероятно малых расстояниях?

Наконец, это явление самой жизни. Почему конгломераты атомов, составляющие наше тело, не только дают нам способность передвигаться, воспроизводить себя, обуславливают все другие свойства, из которых складывается жизнь, но также и позволяют нам мыслить? На этот вопрос не может быть простого ответа, и попытки свести эту проблему к физической задаче никоим образом нельзя считать удовлетворительными. Высказывалось предположение, что «жизнь представляет собой свойство больших молекул»; иначе говоря, если мы понимаем, как растут молекулы полимерных соединений, то незачем заниматься дальнейшими исследованиями природы самой жизни.

Многие ученые затрудняются принять это мнение. Организация атомов нашего тела так удивительно целесообразна — не только с точки зрения эффективного функционирования, но и с точки зрения исправления любых нарушений порядка, — что трудно отказаться от мысли, что за ней скрывается результат деятельности какого-то великого разумного начала. Я сам думаю, что существуют какие-то еще не открытые области науки, которые, может быть, даже не поддаются обнаружению. В качестве примера вернемся снова к магнетизму (стр. 132). Предположим, что не было бы ферромагнитных элементов. Могли бы тогда быть открыты другие формы магнетизма? Дело в том, что для их наблюдения нужны прежде всего сильные магнитные поля, а чтобы их создать, необходимо железо, т. е. ферромагнетик. Мы, возможно, смогли бы дать связную картину периодической системы элементов, не зная ничего о магнетизме, но чтобы придать ей законченный вид, вероятно, потребовалось бы постулировать существование какого-то неизвестного явления.

Таким образом, мы, может быть, приближаемся к концу физики. Проблема связи гравитации и электромагнетизма может оказаться для нас слишком трудной, решение проблемы ядерных сил — слишком дорогостоящим (эксперименты в этой области уже превосходят возможности всех стран, кроме наиболее развитых), а для решения проблемы жизни могут потребоваться какие-то знания, которыми мы не располагаем.

В то же время есть много разделов физики, где открыто широкое поле деятельности. Например, мы очень мало знаем о функционировании атмосферы — о том, как образуется погода, как возникают молнии. Для решения проблем такого рода по-прежнему нужны талантливые люди. Но возможно, что физика в целом уже прошла экстремум в своем развитии. «Центр тяжести» научной деятельности смещается, быть может, в сторону какой-то другой дисциплины, такой, как биология, где физика будет играть важную, но все же подчиненную роль.

Но, может быть, я совершенно неправ. Я широко пользовался книгами, написанными такими учеными, как Лодж, Герц и Дж. Дж. Томсон, свыше 50 лет назад. Обратится ли кто-нибудь через 50 лет к этой книге, чтобы узнать, какие проблемы нас волновали? Будут ли читателей смешить мои довольно наивные мысли? Или их будут изумлять догадки, которые я делал? Я этого уже не узнаю.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора перевода	5
Предисловие автора	7
1. Движение	9
2. Атмосфера	25
3. Теплота	32
4. Газы	45
5. Звук	59
6. Свет	67
7. Оптические инструменты	89
8. Магнетизм и электричество	109
9. Излучение	135
10. Строение вещества	155
11. Строение атомов	179
12. Ограниченность представлений классической физики	193
13. Будущее физики	212

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., д. 2, издательство «Мир».

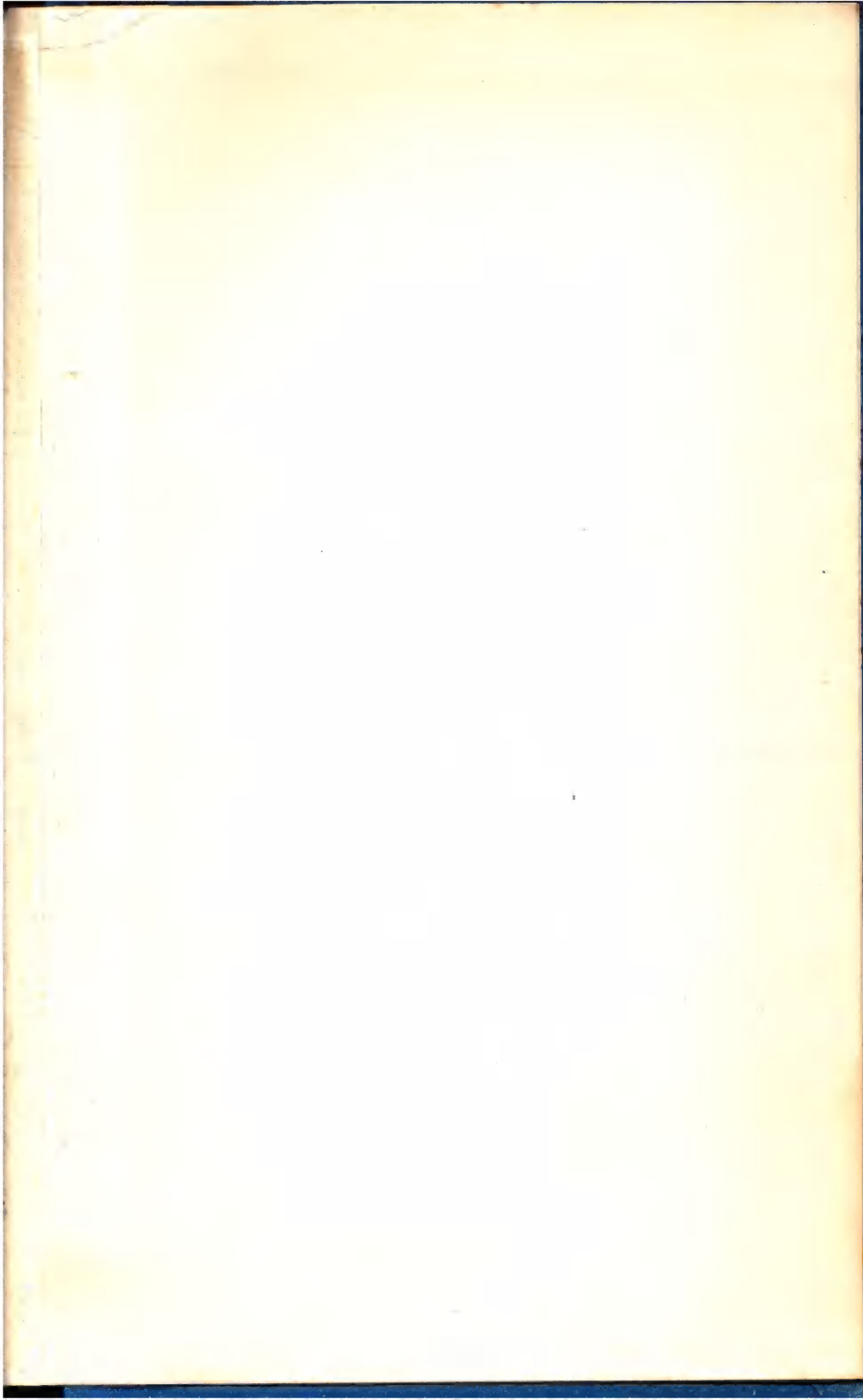
Г. ЛИПСОН ВЕЛИКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ФИЗИКЕ

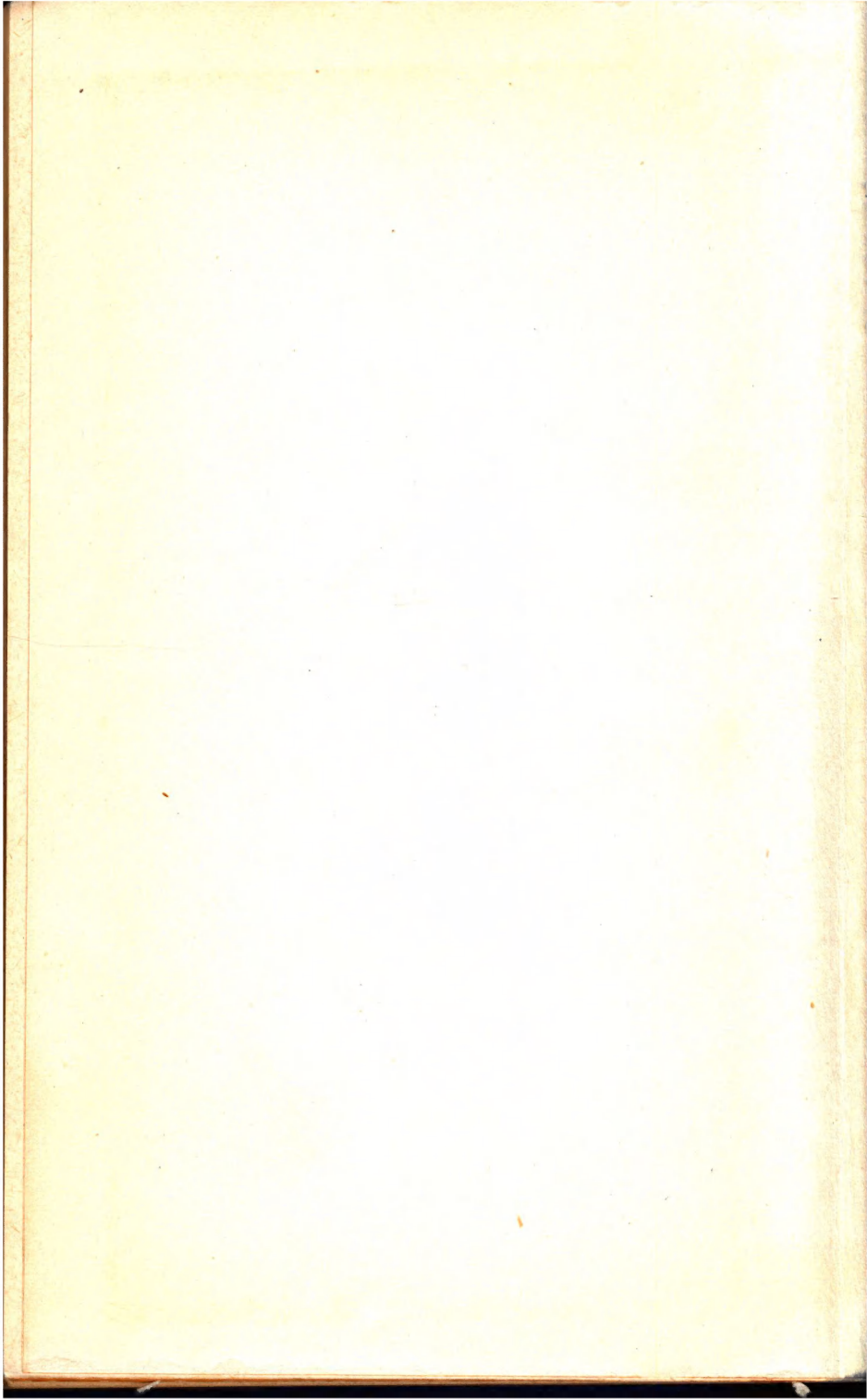
Редактор *В. И. Рыдник*
Художник *В. Стуликов*
Художественный редактор *А. Антонова*
Технический редактор *Г. Алюлина*
Корректор *Н. Спичкина*

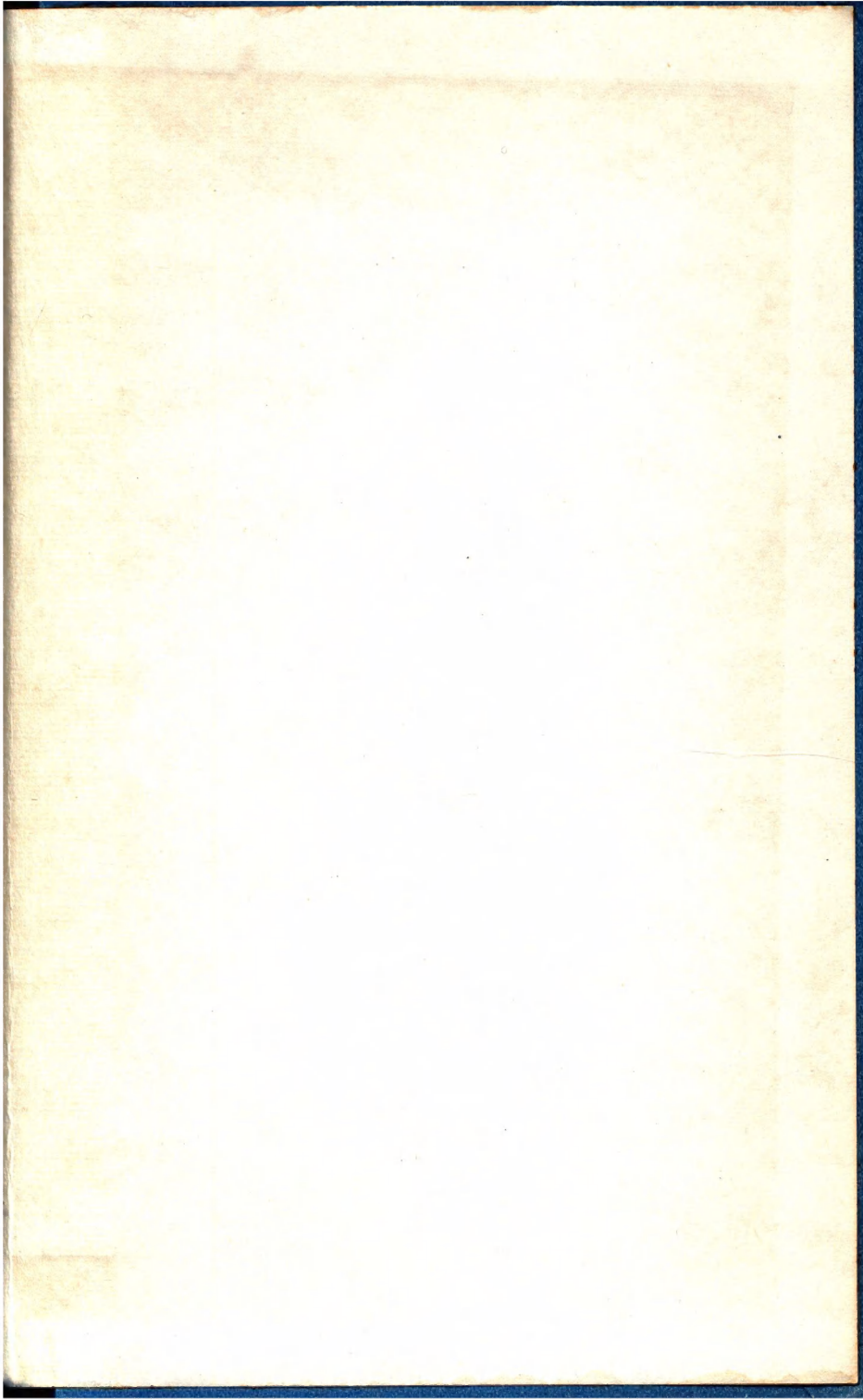
Сдано в набор 29/XII 1971 г. Подписано к печати 22/III 1972 г.
Бумага № 1 $84 \times 108^{1/32} = 3,38$ бум. л. 11,34 усл. печ. л.
Уч.-изд. л. 10,34. Изд. № 2/6274
Цена 66 коп. Заказ № 2594

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова
Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР
Москва, М-54, Валовая, 28









Цена 66 коп.

